

Curgeri axial simetrice Induse

Resursa umană:

Director de proiect: dr. ing. Florentina Bunea
Cercetători cu experiență: prof. dr. ing. Gheorghe Băran
conf. dr. ing. Irina Pincovski
Cercetători în formare: drd. ing. Gabriela Oprina
drd. ing. Mariana Florea
drd. ing. Babutanu Corina Alice

Rezumatul proiectului

Proiectul are ca obiectiv solutionarea analitică a problemei curgerilor induse, cu simetrie axială, în două cazuri particulare, care diferă prin condițiile la limită și forțele motoare. Cazurile ce se propun a fi studiate constituie subiectele tezelor de doctorat a doi doctoranzi cu frecvență. Aceștia vor folosi rezultatele numerice ca bază teoretică în teza de doctorat și le vor compara cu cele experimentale pe care le vor efectua pe instalațiile de laborator existente. Prima problemă se referă la studiul curgerii datorate rotației unui disc în carcasa cilindrică și calculul puterii disipate prin frecare vâscoasă. Solutionarea ei are aplicații în turbomasini, reactoare de amestecare cu discuri etc. A doua problemă constă în studiul curgerii induse de o coloană de bule fine unui lichid în repaus sau în curgere lentă, cu aplicare în domeniul transferului de masă gaz-lichid, ca de exemplu oxigenarea apelor.

Obiectivele generale

- Integrarea numerică a ecuațiilor Navier Stokes pentru cele două probleme la limită, utilizând metoda dezvoltărilor în serii Taylor finite, în condiții de stabilitate a soluției numerice;
- Verificarea în instalațiile experimentale de laborator existente a rezultatelor teoretice obținute.

În domeniul integrării numerice a ecuațiilor Navier Stokes și stabilității soluțiilor obținute, România are rezultate de excepție, începând cu Dumitrescu M., Cazacu M.D. (ZAMM, 1967), până la Neacșu R.M., Ciocănea A. (2002, Editura Dacia).

Proiectul contribuie la dezvoltarea tehnică și tehnologică prin aplicațiile rezultatelor la pompe, compresoare centrifuge ș.a., pe de o parte și în tehnologiile de aerare a apelor, pe de altă parte. În acest ultim caz, randamentele transferului de masă la nivel european sunt de ordinul $10 \div 11\%$.

Prin subiectele abordate, proiectul se încadrează în direcția de acțiune DA1 Susținerea cercetării științifice fundamentale, de frontieră și exploratorie și în domeniul de graniță 1 Modelarea proceselor fizice, chimice, biologice și geologice. Problemele la limită formulate au caracter interdisciplinar: matematică, mecanica fluidelor, mașini hidraulice și pneumatice, transfer de masă.

Menționăm că orice soluție numerică a ecuațiilor Navier Stokes reprezintă un succes științific, ca și verificările experimentale.

[Obiective, activități, gr de realizare;](#)

[Implicare tineri cercetători;](#)

[Rezultate 2007-2009;](#)

[Sinteza lucrării 2007;](#)

[Sinteza lucrării 2008;](#)

[Sinteza lucrării-2009;](#)

[Sinteza lucrării 2010;](#)

Obiective si planul de realizare al proiectului

2007

O1. Stadiul cunoașterii problemelor curgerilor induse, cu simetrie axială

Activitati

- 1.1 Sinteza rezultatelor teoretice și experimentale, publicate pentru curgere indusă de un disc în rotație, în carcasă
- 1.2 Sinteza rezultatelor teoretice și experimentale, publicate pentru curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid în repaus sau în curgere lentă
- 1.3 Analiza condițiilor la limită folosite

O2. Stabilirea domeniilor de curgere pentru problemele propuse

Activitati

- 2.1 Stabilirea geometriei domeniilor de curgere pentru curgere indusă de un disc în rotație
- 2.2 Stabilirea geometriei domeniilor pentru curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid

2008

O1. Stabilirea condițiilor la limita specifice problemele propuse

- 1.1 Studiul condițiilor la limită pentru curgerea indusă de un disc în rotație
- 1.2 Studiul condițiilor la limita pentru curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid
- 1.3 Discretizarea domeniilor de curgere

O2 Integrarea numerică a ecuațiilor Navier Stokes

- 2.1 Reducerea ecuațiilor Navier Stokes adimensionalizate la o ecuație cu derivate parțiale de ordin 4 în funcția de curent
- 2.2 Aplicarea metodei dezvoltărilor în serii Taylor finite. Calculul derivatelor parțiale

O3. Stabilitatea soluției numerice

- 3.1 Deducerea relației algebrice asociată ecuației cu derivate parțiale și stabilitatea soluției numerice
- 3.2 Tratarea nodurilor speciale pentru cele două probleme

2009

O1. Alegerea fluidelor de lucru. Măsurători experimentale

- 1.1 Determinarea proprietăților fizice (densitate, vâscozitate, tensiune superficială) în funcție de temperatura
- 1.2 Stabilirea intervalului de variație a numerelor Re pentru fluidele alese

O2. Soluționarea numerică

- 2.1 Soluționarea numerică a mișcării induse de un disc în rotație, în carcasă
- 2.2 Soluționarea numerică a mișcării induse în lichid de o coloană de bule fine

O3. Punerea în funcțiune a instalațiilor experimentale. Măsurători experimentale

- 3.1 Influența distanței între disc și carcasă asupra eforturilor de frecare vâscoasă
- 3.2 Măsurarea puterii mecanice consumate pe frecare vâscoasă și determinarea coeficienților $C_M = f(Re)$
- 3.3 Studiul stabilității coloanelor de bule fine în funcție de debitul de aer și sarcina hidrostatică
- 3.4 Determinarea fracției de goluri locale și /sau globale
- 3.5 Punerea în funcțiune a dispozitivului de determinare a vitezelor. Cercetări preliminare privind curgerea indusă

2010

O1. Verificarea experimentală a rezultatelor teoretice

- 1.1 Determinarea puterii disipate prin frecare vâscoasă
- 1.2 Determinarea vitezelor induse de coloane de bule fine
- 1.3 Validarea /corectarea rezultatelor teoretice

O2. Diseminarea rezultatelor

- 2.1 Organizarea unei mese rotunde în scopul analizei stadiului actual al cercetării, autoevaluării, auditului în echipă
- 2.2 Participări la simpozioane / conferințe
- 2.3 Comunicarea și publicarea rezultatelor obținute

Obiectivele și activitățile au fost îndeplinite în totalitate. Comisia de avizare constituită prin decizia nr. 1/ din 10.01.2008 luând în examinare lucrările efectuate în cadrul fiecărei etape, a procedat la avizarea internă a lucrărilor. Lucrările au fost prezentate la Seminarul Științific de avizare lucrărilor al ICPE-CA și predate pentru recepție la Autoritatea Contractantă.

Extras din PVA pentru etapele:

➤ 2007

Referitor la curgerea indusă de un disc în rotație, s-au analizat rezultatele teoretice din literatură, obținute prin integrarea analitică a ecuațiilor Navier-Stokes și prin integrare numerică. S-au identificat condițiile care aproximează fenomenul fizic; în cazul integrării numerice, există diferențe semnificative între valorile obținute și cele experimentale. Dealtfel, comparația între rezultatele teoretice și cele experimentale diferă de la o ediție la alta a tratatelor de specialitate, fapt care demonstrează actualitatea problemei.

Referitor la curgerea indusă de coloane de bule, sunt publicate în majoritate rezultate experimentale, care diferă cu $\pm 50\%$ între ele. Cercetările teoretice se referă la aplicații de tip Fluent, care studiază evoluția coloanei în bazine cu lichide, și nu curgerea indusă.

Pentru ambele probleme studiate, în capitolul destinat stabilirii geometriei curgerii s-a formulat corect problema la limită și s-a propus perfecționarea metodei de integrare numerică.

Rezultatele au fost diseminate prin publicarea într-o revistă cotate ISI și o revistă indexată în baze de date internaționale:

- Pincovski I., Oprina G., Bunea F., 2007, *The effect of superficial gas velocity on bubble size distribution in diffused aeration systems*, International Conference Energy-Environment, November 22 – 23, Bucharest, UPB Sci. Bull., Series C, Vol. 69, No. 4, p. 465-472, ISSN 1454-234x.
- Ciocanea A., Florea M., Băran N., Băran G., 2007, *Experimental researches regarding viscous friction on rotating disks*, Revista de Chimie Bucuresti, 58, nr. 12, p. 1291-1297 (ISI)

➤ 2008

În raportul științific / 2008 este prezentat studiul teoretic al curgerii induse cu simetrie axială, în două cazuri: disc în rotație și coloana de bule în apă. Primul caz se rezolvă cu ajutorul metodei dezvoltărilor în serii Taylor finite aplicată la integrarea ecuațiilor Navier-Stokes pentru curgerea indusă de un disc în rotație într-o carcasă cilindrică. S-au adimensionalizat ecuațiile N-S, s-a definit și discretizat domeniul de curgere, s-au pus condițiile la limită și s-a obținut *relația algebrică asociată* ecuațiilor cu derivate parțiale de ordinul patru.

În cel de-al doilea caz studiat s-a utilizat modelul de simulare numerică pentru fluide bifazice Euler-Euler din CFD. S-a ales geometria de curgere, care s-a discretizat convenabil utilizând Metoda Volumului Finit. S-au ales condițiile la limită favorabile curgerii prezentate.

Rezultatele obținute au fost diseminate prin 1 articol ISI și 4 articole în reviste indexate internațional după cum urmează:

- Oprina G., Pincovski I., Bunea F., *Identifying Flow Regime Transitions in Diffused Aeration Systems*, acceptat la 11th International Conference Multiphase Flow in Industrial Plant, Palermo, Italy, September 7-10, 2008, p. 659-666, ISBN 88-88198-1;
- Pincovski I., Oprina G., Bunea F., *Photographic method applied to local gas hold-up measurements*, acceptat la 11th International Conference Multiphase Flow in Industrial Plant, Palermo, Italy, September 7-10, 2008, 667-674, ISBN 88-88198-13-X;
- Oprina G., Băran G., Panaitescu V., Global gas-dynamic strength factors of porous diffusers and the study of gas bubbles formation, UPB Sci. Bull., Series D, vol. 70, no. 2, 2008, ISSN 1454-2358, p. 77-84;
- Florea M., Baran G., Panaitescu V., About viscous dissipation on the disks of turbomachines rotors, UPB, Sci. Bull., Series D, Vol. 70, No. 2, p. 85-92, 2008, ISSN 1454-2358.

➤ 2009

Rezultatele obținute experimental pentru cazul discului în carcasa sunt comparate cu cele calculate cu relații consacrate și se observa că în regimul laminar rezultatele experimentale sunt cu 31% mai mici decât cele calculate.

Pentru regimul de tranziție și turbulent rezultatele experimentale diferă cu 6÷37% față de cele teoretice. Cercetările efectuate extind valorile coeficientului momentului de frecare C_M pentru numere Reynolds cu valori $Re = 10^2 \div 10^3$.

În partea a doua a raportului tehnic, începând cu capitolul 3, după o scurtă analiză a studiilor, privind *stabilitatea coloanei* din literatura de specialitate, se prezintă cercetările de laborator pentru diferite tipuri și dimensiuni de generatoare de bule fine - GBF (ceramice Ø 50, 100 și 150 și din sticlă Ø 50 și 150). S-a constatat că, începând de la un anumit debit de aer numit *debit de stabilitate* (Q_s) coloana de bule își schimbă forma. Q_s este strâns legat de eficiența oxigenării. Testele efectuate în laborator au arătat că eficiența aerării este maximă în jurul valorii de 150 l/h, după această valoare intrându-se pe un palier.

Acest fapt confirmă teoria conform căreia sistemele de aerare cu GBF reduc cheltuielile cu energia, obținând o aerare maximă la valori mici ale debitului de alimentare cu aer. S-au determinat debitele maxime de stabilitate pentru fiecare GBF studiat, prin filmarea repetată a coloanei de bule, la diverse debite de aer $Q = 78 \div 624$ l/h.

La funcționarea cu debite de aer mai mari, se observa efectul de gaz-lift. Pentru realizarea unui transfer de masă eficient și a unor costuri energetice scăzute, trebuie evitată funcționarea la astfel de debite. Efectul de gaz-lift este defavorabil deoarece debitul de aer vehiculat este mare, conducând la un consum energetic ridicat, iar bulele ies prea rapid din sistem.

S-a determinat *fracția de goluri* globală ϵ , pentru GBF Ø 50mm, din sticlă și ceramică. Măsurătorile s-au efectuat pe aceeași instalație experimentală cu care s-a urmărit stabilitatea coloanei la care s-a adăugat un trepid pe care a fost fixată o cameră foto digitală, un compresor prevăzut cu regulator de debit și regulator de presiune, un rotametr și o riglă gradată (pt măsurarea înălțimii stratului de lichid expandat).

Pentru ca rezultatele privind fracția de goluri globală să fie ușor comparate cu cele publicate la nivel internațional, s-a definit *viteza superficială a bulelor* – w (4.4). În figura 4.3 se prezintă variația fracției de goluri globale în funcție de viteza superficială pentru GBF ceramic Ø 50 mm. Se constată că fracția de goluri globală variază liniar cu viteza superficială a aerului, până la o anumită valoare, $w_{trans} \approx 0,2$ cm/s.

Acest regim de funcționare se numește regim omogen. La $w > w_{trans}$ (regim eterogen), bulele mici se adună în "ciorchini" și formează bule mari ducând la scăderea fracției de goluri. Bulele, având viteză ascensională mai mare, părăsesc sistemul mai rapid; astfel, fracția de goluri continuă să crească, însă cu o pantă mai mică decât în regimul omogen. Se observa 3 regimuri de curgere:

- $0 < w < 0,2$ cm/s, regim omogen,
- $0,2 < w < 0,3$ cm/s, regim tranzitoriu,
- $w > 0,3$ cm/s, regim eterogen

Comparând rezultatele experimentale proprii cu cele din literatura (fig. 4.6) se observă același tip de corelație între fracția de goluri și viteza superficială, regimul tranzitoriu fiind marcat de o creștere a lui ϵ .

Rezultatele obținute în etapa 2009 au fost diseminate prin 1 articol ISI, 1 articol în revistă indexată internațional și o cerere de brevet, după cum urmează:

- Oprina G., Bunea F., Pincovski I., Mandrea L., Aspects of hydrodynamics and mass transfer in diffused aeration systems, Environmental Engineering and Management Journal, in curs de recenzie din 2.02.2009 (ISI);
- Bunea F., Oprina G., Ciocan G.D., Băran G., Ilie C., Pincovski I., Aeration parameters optimization for an imposed energy consumption, Technical University of Cluj-Napoca, series: Applied Math. and Mec., No. 52, Vol II, ISSN 1221-5872, 2009, p. 279-284;
- Bunea F., Oprina G., Baran G., Instalatie de laborator pentru determinarea caracteristicilor hidro dinamice ale difuzorilor de bule, Cerere brevet nr. OSIM A/00549/16.07.2009;
- Oprina G., Staicu D., Bunea F., Băran Gh., *Experimental researches regarding the performance of fine bubble generators*, Advanced technologies for the water and wastewater treatment and water reuse, Ed. Cartea Studentească, p. 66-71, ISBN 978-606-501-027-7, 2009.

Implicarea tinerilor cercetatori si modul in care se reflecta in cheltuielile de personal

Solutionarea analitica a problemei curgerilor induse, cu simetrie axiala, in doua cazuri particulare (difera prin conditiile la limita si fortele motoare), constituie subiectele tezelor de doctorat a doua doctorande cu frecventa cu bursă doctorală.

- Gabriela Oprina (teza de doctorat *Contribuții la hidro-gazo-dinamica difuzorilor poroși*) a fost angajata în instituția gazdă cu contract parțial de muncă, pe toată perioada de desfășurare a tezei de doctorat iar după susținerea publica a tezei, a fost angajată permanent. Cheltuielile de personal sunt /au fost acoperite in proporție de aproximativ 65% din bugetul proiectului.
- Mariana Florea (teza de doctorat *Cercetări teoretice și experimentale privind frecarea vâscoasă pe un disc în rotație*) a fost angajata în institutia gazdă cu contract partial de muncă, in perioada de desfășurare a tezei de doctorat. Cheltuielile de personal au fost acoperite in proporție de 100% din bugetul proiectului. După finalizarea tezei de doctorat si susținerea publică, dar si in urma diminuării bugetului din 2009, personalul cu contract parțial de muncă se afla in concediu fără plată.
- Băbuțanu Corina Alice (teza de doctorat *Hidrodinamica reactoarelor de fermentare anaerobă*) face parte din echipa proiectului începând din luna martie 2010. Doctoranda participa la cercetările experimentale privind măsurarea curgerilor induse folosind un sistem acustic de măsurare a vitezei Micro ADV. Cheltuielile de personal acoperite din bugetul proiectului vor fi in proporție de 28,9%

Doctorandele au participat la:

- toate activitățile proiectului. Astfel proiectul de cercetare a contribuit semnificativ la finalizarea tezelor de doctorat ale doctorandelor Gabriela Orina si Mariana Florea, reprezentând capitole importante din teza.
- la toate lucrările stiințifice publicate, rezultate în urma activităților din proiect.

In perioada de desfășurare a proiectului un număr de cinci echipe de studenți ai Facultății de Energetica, anul II, au participat cu lucrări premiate la Cercul Stiintific Studentesc de Mecanica Fluidelor, coordonați fiind de echipa de cercetare a proiectului si utilizând echipamentele si instalațiile achiziționate /up-gradate in acest proiect.

Stadiul realizării indicatorilor de performanță

An	Nr articole acceptate spre publicare în reviste indexate ISI		Nr articole acceptate spre publicare în reviste indexate în baze de date internaționale		Nr. cereri de brevete naționale depuse		Nr. art. publicate la conferințe internaționale	
	propus	realizat	propus	realizat	propus	realizat	propus	realizat
2007	0	1	1	1	0	0	0	0
2008	1	0	1	2	0	0	0	2
2009	1	1	0	1	1	1	0	1
2010			1	In curs				
TOTAL	2	2	3	4	1	1	0	3

În urma rezultatelor obținute în etapele 1, 2 și 3 membrii echipei de cercetare au atins criteriile de performanță propuse și chiar le-au depășit astfel:

2007

- 1 articol ISI și un articol un articol publicat într-o revistă indexată în baza de date internațională

1. Pincovski I, Oprina G, Bunea F, The effect of superficial gas velocity on bubble size distribution in diffused aeration systems, International Conference Energy-Environment, UPB Sci. Bull., Series C, Vol. 69, No4, 2007, p. 465-472, ISSN 1454-234x

2. Ciocanea A., Florea M., Băran N., Băran G., 2007, *Experimental researches regarding viscous friction on rotating disks*, Revista de Chimie Bucuresti, 58, nr. 12, p. 1291-1297

2008

- două articole în reviste indexate internațional și două articole comunicate la 11th International Conference Multiphase Flow in Industrial Plant, Palermo:

1. Oprina G., Băran Gh., Panaitescu V., *Global gas-dynamic strength factors of porous diffusers and the study of gas bubbles formation*, UPB Sci. Bull., Series D, vol. 70, no. 2, 2008, ISSN1454-2358, p. 77-84.
2. Florea M., Baran G., Panaitescu V., *About viscous dissipation on the disks of turbomachines rotors*, UPB, Sci. Bull., Series D, Vol. 70, No. 2, p. 85-92, 2008, ISSN 1454-2358
3. Oprina G., Pincovski I., Bunea F., *Identifying Flow Regime Transitions in Diffused Aeration Systems*, acceptat la 11th International Conference Multiphase Flow in Industrial Plant, Palermo, Italy, September 7-10, 2008, p. 659-666, ISBN 88-88198-1
4. Pincovski I., Oprina G., Bunea F., *Photographic method applied to local gas hold-up measurements*, acceptat la 11th International Conference Multiphase Flow in Industrial Plant, Palermo, Italy, September 7-10, 2008, 667-674, ISBN 88-88198-13-X

- O vizita de documentare a trei cercetatori la Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre de Recherches et Essais en Machines Hydrauliques de Grenoble, vizitarea laboratorului CREMHyG și a laboratoarelor ALSTOM Hydro din Grenoble; Crearea de noi contacte în vederea unor colaborări viitoare privind curgerile bifazice în mașini hidraulice.

2009

- O cerere de brevet a fost depusă la OSIM. Invenția se referă la o instalație de laborator pentru determinarea performanțelor hidrodinamice ale GBF, folosiți pentru aerarea apelor.

1. Bunea F., Oprina G., Baran G., *Instalație de laborator pentru determinarea caracteristicilor hidrodinamice ale difuzorilor de bule*, Cerere brevet nr. OSIM A/00549/16.07.2009

- Un articol a fost trimis spre recenzie din data de 2.02.2009, la o revistă cotate ISI conform bazei de date.

2. Oprina G., Bunea F., Pincovski I., Mandrea L., *Aspects of hydrodynamics and mass transfer in diffused aeration systems*, Environmental Engineering and Management Journal, acceptat spre publicare pentru 2010

- un articol publicat într-o revistă indexată în baza de date internațională

3. Bunea F., Oprina G., Ciocan G.D., Băran G., Ilie C., Pincovski I., *Aeration parameters optimization for an imposed energy consumption*, Technical University of Cluj-Napoca, series: Applied Mathematics and Mechanics, Acta Technica Napocensis, Nr. 52, Vol.II, ISSN 1221-5872, p. 279-284

- un articol publicat la Editura *Cartea Studențească*, și prezentat la o Conferință Internațională.

4. Oprina G., Staicu D., Bunea F., Băran Gh., *Experimental researches regarding the performance of fine bubble generators*, Advanced technologies for the water and wastewater treatment and water reuse, Ed. Cartea Studențească, p. 66-71, ISBN 978-606-501-027-7, 2009

- Medalia de bronz acordată cu ocazia celei de a 13-a ediții a Expozității internaționale de invenții, cercetare științifică și tehnologii noi, INVENTICA 2009, pentru brevetul *Instalație de laborator pentru determinarea caracteristicilor hidrodinamice ale difuzorilor de bule*, Bunea Florentina, Oprina Gabriela, Baran Gheorghe.
- În vederea efectuării activităților de informare-documentare, un cercetător s-a deplasat la Site du SALTO, Italia pentru documentarea privind curgerea indusă din aspiratoarele turbinelor, dar și pentru discuții privind colaborarea într-un proiect privind aerarea apelor turbinate. A rezultat depunerea unui proiect la competiția POS-O2.1.2. Propunerea de proiect a apărut ca o aplicație directă a cercetărilor privind curgerile generate de coloane de bule și are ca obiectiv principal "Stabilirea unei soluții de aerare la CHE pentru a garanta și monitoriza parametrii conținutului de OD astfel încât să se atingă parametrii necesari vieții acvatice".

Concluzii

- Proiectul a îndeplinit toate obiectivele propuse conform planului de realizare și a depășit indicatorii stabiliți;
- În cadrul proiectului au fost realizate și susținute 2 teze de doctorat, și un al treilea doctorand (angajat în etapa 2010) va participa la desfășurarea activităților experimentale privind curgerea indusă.

CURGERI AXIAL SIMETRICE INDUSE

Sinteza lucrării

Cuprinsul lucrării

1. Stadiul cunoașterii problemelor curgerilor induse, cu simetrie axială
 - 1.1 Sinteza rezultatelor teoretice și experimentale, publicate, pentru curgerea indusă de un disc în rotație în carcasă
 - 1.2 Sinteza rezultatelor teoretice și experimentale, publicate pentru curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid în repaus sau în curgere lentă
 - 1.2.1 Mișcarea indusă în lichide de coloane de bule
 - 1.2.2 Regim static de curgere
 - 1.2.2.1 Viteza indusă la suprafața liberă
 - 1.2.2.2 Variația vitezei induse pe adâncime
 - 1.2.3 Regim dinamic de curgere
 - 1.2.3.1 Viteza indusă pe suprafața liberă
 - 1.2.3.2 Distribuția de viteze pe adâncime
 - 1.2.3.3 Influența vitezei curentului asupra transferului de oxigen
 - 1.3 Analiza condițiilor la limită folosite
 - 1.3.1. Condiții la limită folosite de Bech K. Geometria domeniilor pentru curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid
 - 1.3.2. Stabilirea condițiilor la limită pentru curgerea indusă de un disc în rotație
 2. Stabilirea domeniilor de curgere pentru problemele propuse
 - 2.1 Stabilirea geometriei domeniilor de curgere pentru curgere indusă de un disc în rotație
 - 2.2 Stabilirea geometriei domeniilor de curgere indusă de o coloana de bule într-un lichid
 - 2.2.1 Stabilirea geometriei de curgere folosind programul GAMBIT
 - 2.2.2 Stabilirea geometriei de curgere folosind modelarea matematică prin metoda dezvoltărilor în serii Taylor finite
- Bibliografie

Bibliografie selectivă

Curgerea indusă de un disc în rotație

- 1 Florea M. *Coeficientul de frecare vascoasă la discuri în rotație uniformă*. Lucrările celei de a 4 – a conferințe a hidroenergeticienilor din România, mai 2006, V.I., pag. 1-8, Buc.2006, ISBN 973-718-486-6
- 2 Stava P., Zaponel J., Wagnerova, Zubik P., Investigation of instabilities during transition from laminar to turbulent flow in the gap between two concentric discs, one rotating, by methods of nonlinear dynamics, *Strojnicky casopis*, 55, C. 2, p. 100-118, 2004.
- 3 Neacsu R.M.R., Baran Gh., Ciocanea A., *Studiul mișcării lichidului vâcos între rotorul și carcasa unei turbomașini*, A 2-a Conf. A Hidroenergeticienilor din România *Dorin Pavel*, București, p. 561-568, mai 2002, ISBN 973-578-3.
- 4 Schlichting H., Gerten K., *Boundary layer theory*, 8th Revised and Enlarged Edition, Springer, Bochum, may, 1999.
- 5 Cazacu M.D., Petcu M., Banescu A., *Axisymmetrical motion of the viscous liquid in the disk mill*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Mec. Appl., Tome 33, nr. 2, p. 159-184, 1988.

Curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid

- 6 Abraham G., Burgh P., 1964, *Pneumatic reduction of salt intrusion through locks*, Proceedings, American Society of Civil Engineers, 90, (HY1), p.83-119.
- 7 Baines W. D., Hamilton G. F., 1959, *On the flow of water induced by a rising column of air bubbles*, Proceedings of 8th Congress of the International Association for Hydraulic Research, Montreal, Canada, 7D, p. 1-21.
- 8 Basco D. R., 1971, *Pneumatic barriers for oil containment under water, wave and current conditions*, Proceedings, Joint Conference of Prevention and Control on Oil Spills, American Petroleum Institute (API), Washington, D. C., p. 381-391.
- 9 Bech K., 2005, *Dynamic simulation of a 2D bubble column*, Chemical Engineering Science, 60, p. 5294-5304
- 10 Bulson P. S., 1961, *Currents produced by an air curtain in deep water*, The Dock and Harbour Authority, 42, p. 15-21.
- 11 Burns L. F., Rice R. G., 2004, *Circulation in bubble columns*, Fluid Mechanics and Transport Phenomena, AIChE Journal, V. 43, Issue 6, p. 1390 – 1402.
- 12 Jones W. T., 1972, *Air barriers as oil-spill containment devices*, Society of Petroleum Engineers Journal. 12 (2), p. 126-142.
- 13 Lo J. M., 1991, *Air bubble barrier effect on neutrally bouyant objects*, Journal of Hydraulic Research, IAHR, vol. 29, no. 4, p. 437-455.
- 14 Taylor G. I., 1955, *The action of a surface current used as a breakwater*, Proceedings, Royal Society of London, Series A 231, p. 466-478.
- 15 Wen J., Torrest R. S., 1987, *Aeration-induced circulation from line sources*, I: Channel flow, Journal of Environmental Engineering, 113, p. 82-98.
- 16 Wilkinson D. L., 1979, *Two-dimensional bubble plumes*, Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 105, (HY2), p. 139-154.

1. STADIUL CUNOAȘTERII PROBLEMELOR CURGERILOR INDUSE, CU SIMETRIE AXIALĂ

1.1 Sinteza rezultatelor teoretice și experimentale, publicate, pentru curgerea indusă de un disc în rotație în carcasă

Teoria și practica turbomașinilor (pompe și ventilatoare centrifuge) a utilajelor de proces (amestecătoare cu elice, cu discuri ș.a.) constituie principalele domenii de aplicare a cercetărilor privind rotația uniformă a unui disc circular în carcasă. Se definesc numărul Reynolds Re și coeficientul de frecare vâscoasă pe disc C_M prin relațiile:

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu}, \quad C_M = \frac{M}{\rho/2 \cdot \omega^2 R^5} \quad (1.1.1)$$

cu: ω – viteza unghiulară, R – raza discului, ρ , ν – densitatea și vâscozitatea cinematică a fluidului de lucru și obiectivul cercetărilor constă în determinarea dependenței $C_M(Re)$ în regim laminar sau turbulent, pe discuri netede sau rugoase.

Partea teoretică se referă la rotația unui disc în fluid nelimitat și cu această ipoteză s-au integrat ecuațiile Navier-Stokes și s-au obținut soluțiile Karman (1.1.2a) și Cochran (1.1.2b)

$$C_M = \frac{4,7}{\sqrt{Re}} \quad (1.1.2.a)$$

$$C_M = \frac{3,87}{\sqrt{Re}} \quad (1.1.2.b)$$

Pentru regim turbulent ($3 \cdot 10^5 < Re < 10^6$) tot Kármán obține relația:

$$C_M = \frac{0,146}{(Re)^{1/5}} \quad (1.1.3)$$

Aceste rezultate au fost confirmate mai mult sau mai puțin de cercetările experimentale sintetizate cu diagrama din fig. 1.1.1. Dependența $C_M(Re)$:

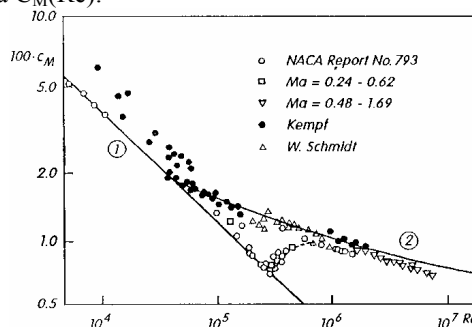


Fig. 1.1.1., Dependența $C_M(Re)$ [4], (1- ecuația (2.b) și 2 - ecuația (3))

În ediții mai vechi [4], diagrama conține alte relații de calcul și măsurători la care s-a renunțat. În România primele cercetări teoretice sunt publicate, în 1988 [5] și reluate de alți autori în 2002 [3] și se referă la integrarea numerică a ecuațiilor Navier – Stokes utilizând metoda dezvoltărilor finite, după reducerea sistemului de ecuații la o ecuație cu derivate parțiale de ordinul IV în funcția de curent. Spectrul vitezelor și al liniilor de curent obținut este plauzibil fizic, dar valorile C_M sunt de circa două ori mai mari [3] decât cele calculate cu formulele prezentate în domeniul $Re = 20 \div 160$. Menționăm cazul nestăionar și problema tranziției laminar-turbulent [2], [4]; o sinteză a rezultatelor publicate este prezentată în [1].

1.2 Sinteza rezultatelor teoretice și experimentale, publicate pentru curgerea indusă de o coloană de bule într-un lichid în repaus sau în curgere lentă

1.2.1 Mișcarea indusă în lichide de coloane de bule

Se prezintă elemente de cinematică a mișcării induse de către coloanele de bule în cazul static (lichid în repaus) și dinamic (lichid în curgere): viteza maximă indusă și poziția acesteia, variația vitezei pe suprafața liberă, repartitia de viteze induse. Aceste mărimi sunt necesare pentru stabilirea cotelor de montaj a GBF in situ.

1.2.2 Regim static de curgere

Se consideră schema de curgere indusă din figura 1.2.1 în care coloana de bule este generată de o țevă de lungime 0,5915 m, montată într-un canal cu $L \times B \times H = 50 \times 0,6 \times 1,2$ m, prevăzută cu 30 de orificii $\varnothing 1,5$ mm.

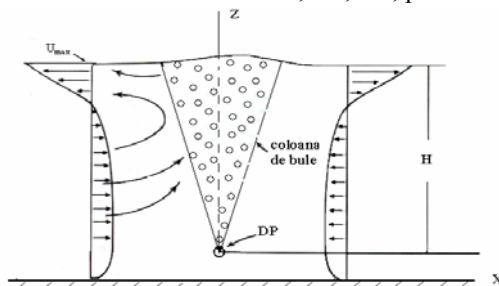


Fig. 1.2.1., Schema curgerii induse de coloane de bule de aer

Viteza maximă v_{max} indusă de coloana de bule se calculează cu relația

$$v_{\max} = k(gq)^{1/3}, \quad (1.2.1)$$

cu $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, q debitul de aer pe metru liniar ($\text{m}^3/\text{s/m}$) și k o constantă; valorile acesteia sunt date în tabelul 1.2.1.

Tabelul 1.2.1, Valorile constantei k

Sursa	Laborator sau prototip	Adâncimea apei, H [m]	Distanța orizontală de la punctul de viteză maximă la suprafață până la axa Z	Valoarea lui k
Evans, 1955	Laborator	0,91	—	1,1
Bulson, 1961	Prototip	$2,59 \div 10,36$	$(0,5 \div 0,75)H$	1,46
Abraham&Burgh, 1964	Prototip	11	$(0,3 \div 0,6)H$	1,22
Basco, 1971	Laborator	$0,30 \div 2,35$	$(0,3 \div 0,6)H$	1,5
Jones, 1972	Laborator	2,13	$0,4H$	1,47
Lo, 1991	Laborator	$> 0,75$	$0,2H$	1,56

H – distanța verticală de la suprafața liberă la difuzor

S-a constatat experimental că valorile constantei k nu depind de presiunea aerului din difuzor, de raza r_0 a orificiilor, respectiv porozitatea DP. Aceste afirmații nu sunt corecte deoarece, în cazul unor coloane de bule izolate, raza inițială a bulelor depinde de r_0 , iar pentru porozități uniforme este necesară o presiune minimă de funcționare, dată de sarcina hidrostatică și tensiunea superficială.

1.2.2.1 Viteza indusă la suprafața liberă

Se admite ipoteza că $v_{\max}$ este egală cu viteza indusă în lichid, la suprafața liberă, $U_{\max}$.
Cu $k = 1,5$ și $q = 10 \text{ l/min}$, $v_{\max}$ are valoarea

$$v_{\max} = 1,5(9,81 \cdot 10 \cdot 10^{-3} / 60)^{1/3} = 0,176 \text{ m/s}. \quad (1.2.2)$$

Pentru un debit de aer $q = 10 \text{ l/min}$, prin cele 30 de orificii cu secțiunea $S = \pi/4(1,5 \cdot 10^{-3})^2 = 1,766 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ trece un debit de aer de $0,055 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ și viteza în orificiu este

$$v_0 = 1/18 \cdot 10^{-4} \cdot 1/(1,766 \cdot 10^{-6}) = 3,145 \text{ m/s}, \quad (1.2.3)$$

diferită ca ordin de mărime de $v_{\max}$ și, mai mult, în loc de emisie de bule se realizează un jet de bule.

Conform măsurătorilor [Lo, 1991], $v_{\max}$ se obține la distanța $x/H = 0,2$ cea mai mică valoare obținută experimental (tabelul 1.2.1).

Tabelul 1.2.3, Variația $u/u_{\max}(x)$

Sursa	x	$u/u_{\max}$	Observații
Bulson, P.S., 1961	$(0,5 \div 2)H$; $x > 2H$	$x^{-0,3}$ $x^{-1,4}$	$2,59 < H < 10,36$
Jones, W.T., 1972	$(0,5 \div 1)H$ $x > H$	$x^{-0,5}$ $> x^{-0,5}$	—
Wen, J. et col., 1987	$(0,6 \div 2,5)H$	$x^{-0,5}$	—
Lo, Jen-Men, 1991	$(0,2 \div 0,5)H$ $(0,5 \div 1,2)H$ $x > 1,2H$	$x^{-0,25}$ $x^{-0,5}$ $x^{-1,5}$	—

Constanta k depinde de adâncimea H și de cota x ; astfel, pentru $H > 0,75 \text{ m}$, $k = 1,26$ la $x = 0,5H$ și $k = 1,56$ la $x = 0,2H$. Rezultă, pentru $H = 1 \text{ m}$, că pe o distanță de la ax de $(0,5 - 0,2)H = 0,3H \cong 0,3 \text{ m}$ viteza la suprafața liberă a scăzut cu 20%.

Viteza la suprafața liberă este zero la $y = 0$, respectiv $x = 2H$. Conform măsurătorilor, la $x/H = 2$, viteza la suprafața liberă este $(0,2 \div 0,35)v_{\max}$; valorile mai mici corespund adâncimilor și debitelor de aer mai mici. Se constată că măsurători la distanțe mai mari ($x > 2,5H$) sunt relativ puține și limitarea domeniului se explică prin valorile mici ale vitezelor, dificil de măsurat. De exemplu, la $x = 3H$, (Bulson P.S., 1961), rezultă $u/u_{\max} = 0,116$; dacă $u_{\max} = 0,176 \text{ m/s}$, atunci $u \cong 0,02 \text{ m/s}$. Laboratoarele de Hidraulică din Delft construiesc aparate electromagnetice cu gama $0 \div 5 \text{ m/s}$, cu eroarea de $0,35 \text{ cm/s}$ și debitmetre Laser Doppler pentru $1 \text{ mm/s} \div 2 \text{ m/s}$, cu eroarea de $0,5 \text{ mm/s}$.

1.2.2.2 Variația vitezei induse pe adâncime

Pe verticală, există o valoare a adâncimii h în care viteza este zero (fig. 1.2.1). În plus, $u(z)$ variază liniar pentru $h \leq z \leq H$. Nu este stabilită o relație teoretică pentru determinarea distanței x la care $u_{\max} = 0$.

Tabelul 1.2.4, Adâncimea h la care viteza este zero

Sursa	h	x
Taylor, G.I., 1955	$0,28H$	—

Jones, W.T., 1972	0,25H	$x = 0,5H$
Lo, Jen-Men, 1991	0,18H	$x = 0,5H$

Variația raportului $u/u_{\max}$ în funcție de x , stabilită experimental, este dată în tabelul 1.2.4.

1.2.3 Regim dinamic de curgere

Cercetările experimentale au urmărit influența vitezei apei – prin viteza de curgere medie, u_c – asupra curgerii induse: vitezele la suprafața liberă și variația profilului vitezelor pe adâncime.

1.2.3.1 Viteza indusă pe suprafața liberă

Notând cu $u_{\max}^0$ viteza indusă la suprafața liberă, la $u_c = 0$ și $u_{\max}'$ la $u_c \neq 0$, s-au obținut datele din tabelul 1.2.5.

Tabelul 1.2.5, Influența curentului de lichid asupra vitezei induse pe suprafața liberă [Lo, 1991]

x/D	Condiții de testare								
	Adâncimea apei = 0,8 m			Adâncimea apei = 0,6 m			Adâncimea apei = 0,4 m		
	apă calmă	Curentul pe canal [m/s]		apă calmă	Curentul pe canal [m/s]		apă calmă	Curentul pe canal [m/s]	
		0,06	0,1		0,06	0,1		0,06	0,1
0,10	0,21	0,16	0,08	0,20	0,15	0,03	0,14	0,14	-0,03
0,2*	0,22	0,17	0,11	0,21	0,16	0,02	0,20	0,15	-0,02
0,30	0,20	0,14	0,06	0,20	0,14	-0,01	0,19	0,14	-0,04
0,40	0,19	0,13	0,05	0,18	0,12	-0,04	0,17	0,13	-0,06
0,50	0,17	0,11	-0,05	0,17	0,11	-0,05	0,16	0,12	-0,07
0,75	0,15	-0,07	-0,08	0,15	0,08	-0,08	0,15	0,08	-0,08
1,00	0,13	-0,03	–	0,13	0,04	-0,09	0,13	0,05	-0,09
1,25	0,12	-0,04	–	0,12	-0,03	–	0,12	0,03	–
1,50	0,11	-0,05	–	0,10	-0,05	–	0,09	-0,03	–
1,75	0,09	–	–	0,08	-0,06	–	0,08	-0,04	–
2,00	0,07	–	–	0,07	–	–	0,05	-0,04	–

* locul în care se găsește curentul maxim de suprafață

Conform rezultatelor lui Basco (1971), se poate aplica principiul superpoziției

$$u_{\max}' = u_{\max}^0 - u_c, \quad (1.2.4)$$

cu $u_{\max}^0$ viteza indusă la $u_c = 0$.

Alte rezultate (Jones W.T., 1972) infirmă această propunere; mai mult, există viteze de curgere care nu modifică $u_{\max}^0$.

Măsurători sistematice, efectuate la diverse adâncimi ale apei și ale vitezei curentului, arată condițiile și zonele în care $u_{\max}$ devine, sub acțiunea curentului, negativ.

La viteze u_c mici (0,06 m/s), $u_{\max} = 0$ la distanțe x/H mai mari, odată cu scăderea lui x și invers, la u_c mari (0,1 m/s), x/H scade odată cu H .

1.2.3.2 Distribuția de viteze pe adâncime

Măsurători efectuate [Lo, 1991] la $q = 8$ l/min, $u_c = 0,06$ m/s și $H = 4$ m, respectiv 8,6 m arată o reducere a valorii h la cca. $h \approx 0,18H$, adâncimea la care viteza este zero. La debite de aer de 8 l/s, $H = 1,8$ m și $u_c = 0,1$ respectiv 0,2 și 0,3 m/s, h se reduce la $h \approx 0,1H$.

Se constată că principiul superpoziției se aplică relativ corect pe treimea inferioară a adâncimii; la curgerea inversă și la $H = 4$, respectiv 6 și 8 m se obțin valori calculate mai mari decât cele măsurate. În schimb, valorile h la care viteza este zero sunt mai mici (cca. $0,1H$) decât vitezele calculate.

1.3 Analiza condițiilor la limită folosite

1.3.1. Condiții la limită folosite de Bech K. Geometria domeniilor pentru curgerea indusă de o coloana de bule într-un lichid

Descrierea geometriei

Instalația de laborator pe care s-a modelat comportarea unei coloane de bule are 0,45 m înălțime și secțiune pătrată, de latură 0,2 m. În toate cazurile simulate s-a lucrat cu o viteză superficială a gazului de 0,167 cm/s (corespunzătoare debitului de $Q = 4$ l/min), similare experimentelor realizate de Becker et al. (1999). S-au ales parametri fizici ai apei și aerului pentru temperatura camerei: $\rho_l = 998$ kg/m³, $\rho = 1,3$ kg/m³, $\mu_c = 0,001$ Pas și $\mu_d = 1,75 \cdot 10^{-5}$ Pas.

Descrierea modelului

Simularea s-a realizat cu o versiune adaptată a modelului descris de Manninen et al. (1996). Modelul numeric consideră apa faza continuă și bulele de gaz faza dispersă.

Ecuția de continuitate este

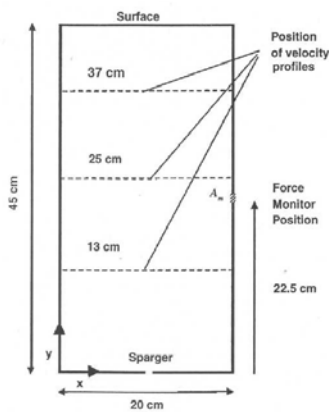


Fig. 1.3.1, Schița instalației experimentale și punctele/planurile de măsură

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (1.3.1)$$

cu ρ densitatea amestecului și u_j componenta j a vitezei amestecului.

Ecuția de conservare pentru fracția de volum dispersată este

$$\frac{\partial \alpha^d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \alpha^d [u_j + (1 - c^d) u_j^{dc}] \right\} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D^{md} \frac{\partial \alpha^d}{\partial x_j} \right), \quad (1.3.2)$$

cu α^d fracția de volum a fazei dispersate și c^d concentrația fazei dispersate (1.3.5).

Componenta j al vitezei relative dintre faza dispersată și faza continuă este

$$u_j^{dc} = u_j^d - u_j^c. \text{ Constanta de difuzie turbulentă se exprimă astfel}$$

$$D^{md} = \nu + D_t^d \nu_t. \quad (1.3.3)$$

Viscozitatea cinematică a amestecului este $\nu = \mu / \rho$, unde μ este viscozitatea dinamică. Viscozitatea turbulentă $\nu_t = \mu_t / \rho$ va fi definită mai jos.

Valoarea constantei de difuzie aplicată este $D_t^d = 1,2$ pe baza experimentelor numerice asupra difuziei turbulente efectuate de Moraga et al. (2001). Ecuția de moment este

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) 2 S_{ij}] + \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c^c c^d u_i^{dc} u_j^{dc}), \quad (1.3.4)$$

unde p este presiunea amestecului, gradul de forfecare $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ și g accelerația gravitațională.

Proprietățile amestecului sunt definite de

$$\rho = \sum_{k=1}^2 \alpha^k \rho^k, \nu = \sum_{k=1}^2 \alpha^k \nu^k, u_i = \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^2 \alpha^k \rho^k u_i^k = \sum_{k=1}^2 c^k u_i^k, \quad (1.3.5)$$

care definește, de asemenea și concentrația c^k a fazei k . Indicii 1 și 2 corespund celor două faze: continuă și dispersă.

Condiții la limită

S-au pus condițiile de suprafață liberă, adică efortul tangențial de frecare este zero la suprafața liberă. Pe ceilalți pereți s-a pus condiția de nealunecare/aderență ($\nu=0$, no-slip). Condiția la limită pentru fracția de volum dispersată a fost gradient zero (sau flux /curgere zero) pe pereți, cu excepția generatorului de bule și a suprafeței libere. Prin generator s-a injectat un debit de aer constant.

La suprafață, debitul de aer prin fiecare celulă de calcul a fost $\rho_d \alpha U_T A_{2D}$, unde A_{2D} este aria pe adâncime a feței celei coincidând cu suprafața. În practică, condițiile la limită pentru generatorul de bule fine (GBF) și pentru suprafața liberă (SL) au fost implementate ca termeni sursă în ecuațiile (1.3.1), (1.3.2) și (1.3.4). Această procedură a asigurat conservarea masei și a momentului în celulele de calcul din vecinătatea GBF și a SL. Conservarea globală a masei a fost satisfăcută, cu excepția perioadei inițiale (când bulele au parcurs distanța dintre GBF și SL). După fenomenul tranzitoriu inițial, fracția volumică de gaz de sub suprafața liberă a fost suficientă astfel încât să asigure debitul de gaz (ieșit) necesar conservării globale a masei.

Implementarea și calculul

Modelul dat de ecuațiile (1.3.1) ÷ (1.3.4) s-a implementat în Fluent 6.1.22 ca *user defined functions* (u.d.f.). S-a rulat programul Fluent ca program curgere unifazică (single phase flow). S-au implementat, via u.d.f., o ecuație adițională de transport pentru volumul fracției dispersate, termenii sursă din ecuațiile masei și a momentului, ca și calculul proprietăților fizice. S-a aplicat schema de interpolare QUICK pentru termenii convectivi și instrucțiunea timp implicit de ordinul al doilea (second order implicit time stepping). Modelul lungimii de amestec s-a implementat via u.d.f.

Tabel 1.3.1, Cazurile de simulare ale coloanei de bule

Caz	N	Model	T [s]	Comentarii/Observații
1	5040	Lungime de amestec	14,9	$D_t^d = 0$
2	5040	Lungime de amestec	14,8	
3	20160	Lungime de amestec	13,0	
4	80640	Lungime de amestec	16,0	
5	5040	Lungime de amestec	1,0	$\ell = 0,01 \text{ m}; D_t^d = 0$
6	5040	Lungime de amestec	10,7	$\ell = 0,18 \text{ m}; D_t^d = 0$

Incertitudinea perioadei de oscilație T a fost de aproximativ 0,1 s; cu N s-a notat numărul de celule de calcul.

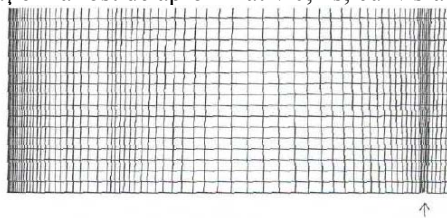


Fig. 1.3.2 Detaliu al gridului cu 20160 de celule de calcul. GBF este indicat cu o săgeată

1.3.2. Stabilirea condițiilor la limită pentru curgerea indusă de un disc în rotație

Cu variabila adimensională $\zeta = z\sqrt{\omega/\nu}$ Karman aplică metoda separării variabilelor pentru viteze și presiuni, în mișcarea axial simetrică:

$$V_r = \omega r F(\zeta); V_\theta = \omega r G(\zeta); V_z = \sqrt{\nu\omega} H(\zeta); p = \rho\nu\omega P(\zeta), \quad (1.3.6)$$

Cu condițiile la limite pentru viteze

$$F(0)=0; G(0)=1; H(0)=0; P(0)=0 \\ \zeta \rightarrow \infty; F=0; G=0 \quad (1.3.7)$$

Din ecuațiile Navier – Stokes și continuitate se obține un sistem de ecuații diferențiale de ordinul doi. Pentru a rezolva sistemul introduce o ipoteză suplimentară: există $\zeta_0 = \delta\sqrt{\omega/\nu}$ astfel încât pentru F și G sunt practic nule, ipoteză care aproximează idea de strat limită. În final, cu $\lambda = \zeta/\zeta_0$ se obțin funcțiile F , G , și H sub formă de polinoame, deci condiția de mari distanțe, matematic, nu este satisfăcută, dar corectă în ipoteza stratului limită. De fapt singura componentă care dă moment de frecare pe disc este V_θ și:

$$\tau = \eta \cdot r \cdot \omega \sqrt{\omega/\nu}; G'(0) = (-3/2) \cdot \eta \cdot r \cdot \omega \sqrt{\omega/\nu}.$$

Celelalte componente au doar valoare teoretică și permit calculul debitului expulzat și cel afluent.

Cochran introduce condiții suplimentare privind funcțiile H și derivatele H' și H'' deduse din sistemul de ecuații menționat și fără a mai utiliza ipoteza stratului limită îl integrează numeric.

În metodele numerice aplicate [3] soluția este limitată la $Re \leq 200$.

În etapa următoare se va perfecționa metoda de integrare numerică cel puțin în domeniul laminar.

2. STABILIREA DOMENIILOR DE CURGERE PENTRU PROBLEMELE PROPUSE

2.1 Stabilirea geometriei domeniilor de curgere pentru curgere indusă de un disc în rotație

Domeniul de curgere axial – simetric este constituit dintr-un cilindru de înălțime H și diametrul D , în care se rotește uniform un disc subțire de rază R (fig. 2.2.1)

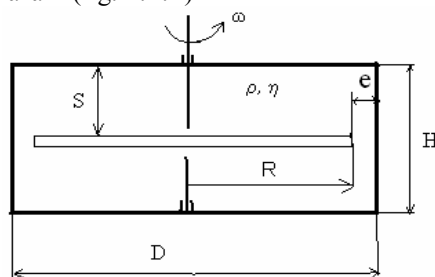


Fig. 2.2.1, Schița discului montat în carcasă

În prima etapă $s/R = 1$ cu $R = 50$ mm, $e = 1$ mm și $Re = 200 \div 10^6$; Re și ω se limitează la valori ω_0 la care apare pâlnia Rankine; ω_0 se determină experimental, realizând curgerea.

Se neglijează frecarea în carcasă pe ax ($\varnothing = 10$ mm) și se vor studia și cazurile $s/R = 1/2, 1/5$ pentru evaluarea influenței carcasei.

2.2 Stabilirea geometriei domeniilor pentru curgerea indusă de o coloană de bule într-un lichid

2.2.2 Stabilirea geometriei de curgere folosind programul GAMBIT

Pentru simularea comportamentului coloanei de bule în lichid (apă) în repaus, s-a ales realizarea unei geometrii 2D, conform cazului experimental. Deoarece problema bifazică studiată prezintă simetrie axială, este suficientă realizarea unei geometrii ca în figura 2.2.2.

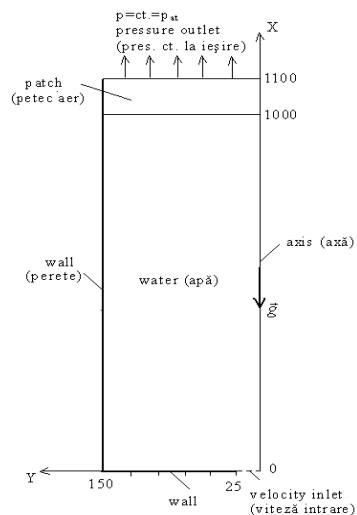


Fig. 2.2.2, Schița domeniului de calcul



Fig. 2.2.3, Geometria domeniului de curgere realizată în Gambit

Geometria se realizează cu simetrie axială, după axa Ox ; s-a definit un „petec” (pernă de aer) de aer reprezentând porțiunea de la suprafața liberă până la limita fizică a bazinului; s-au definit cele două faze aflate în contact (apa – faza primară, respectiv aerul – faza secundară); s-a definit porțiunea de intrare în domeniu a debitului de gaz insuflat (jumătate din dimensiunea fizică a difuzorului poros, datorită simetriei axiale), mai exact a vitezei la intrare. Geometria prezentată în figura 2.2.2 s-a discretizat printr-un mesh regulat, format din 30000 celule de calcul cuadrilaterale (fig. 2.2.3). Prin realizarea acestui grid (mesh) au rezultat: 30651 noduri. În zona de insuflare a aerului comprimat prin difuzorul poros (între 0 și 25 mm, pe axa Oy) s-a realizat un grid mai fin (fig. 2.2.4), cu un pas de 2,5 mm; în restul domeniului s-a impus un pas de 3,75 mm.

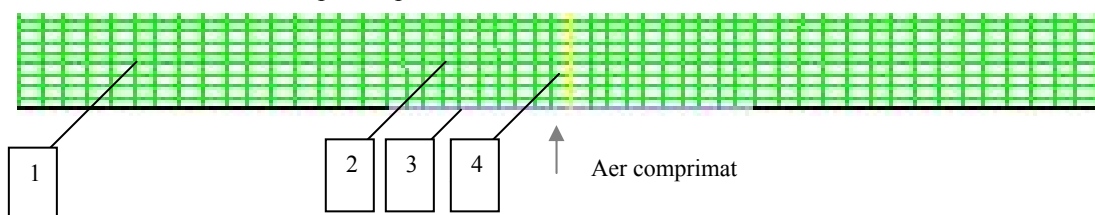


Fig. 2.2.4, Detaliu asupra domeniului discretizat: 1) Grid cu pas 3,75 mm, 2) Grid cu pas 2,5 mm, 3) mediu poros, 4) axa de simetrie

2.2.2 Stabilirea geometriei de curgere folosind modelarea matematică prin metoda dezvoltărilor în serii Taylor finite

Domeniul curgerii este ABCD. Se cunosc: proprietățile fizice ale lichidului, cotele necesare ($\varnothing D$, H , $\varnothing d$), debitul de aer Q_{aer} .

Coloana de bule OABD este stabilă în spațiu și timp. În jurul coloanei se consideră o peliculă de lichid, cu grosime δ de ordinul grosimii stratului limită, numită *frontiera lichidă*.

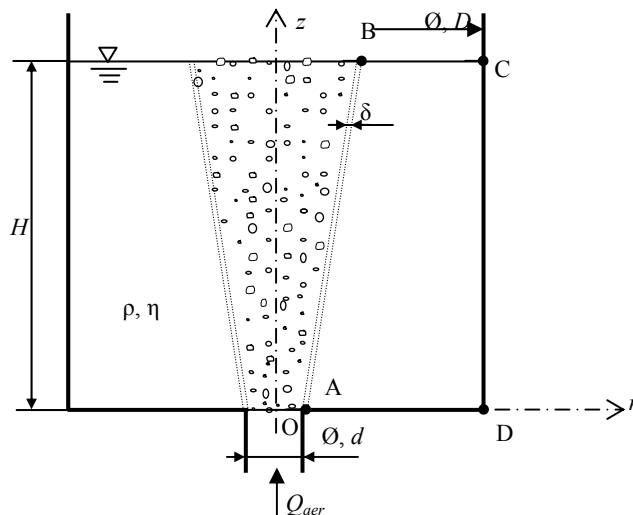


Fig. 2.2.5, Domeniul de curgere al coloanei de bule într-un lichid

Curgeri axial simetrice induse

Sinteza lucrării

CUPRINS

Partea I Cercetări teoretice privind curgerea indusă de un disc circular în rotație

1. Introducere
2. Stabilirea condițiilor la limita specifice discului în rotație.
3. Integrarea numerică a ecuațiilor Navier Stokes
 - 3.1. Reducerea sistemului de ecuații cu derivate parțiale
 - 3.2. Adimensionalizarea ecuațiilor Navier-Stokes în funcția de curent
 - 3.3. Metoda dezvoltării în serii Taylor finite. Discretizarea domeniilor de curgere.
- Calculul derivatelor parțiale
4. Stabilirea soluției numerice
 - 4.1 Tratarea nodurilor speciale
 - 4.2 Deducerea relației algebrice asociată ecuației cu derivate parțiale
5. Concluzii

Partea II Cercetări teoretice privind curgerea indusă de o coloană de bule

1. Modelarea curgerilor bifazice – prezentare generală
- 2 Geometria domeniului în cazul studiului mișcării induse de o coloană de bule
3. Discretizarea domeniilor de curgere
4. Integrarea numerică a ecuațiilor Navier Stokes
 - 4.1. Reducerea sistemului de ecuații cu derivate parțiale
 - 4.2 Deducerea relației algebrice asociată ecuației cu derivate parțiale
5. Condițiile la limită pentru curgerea indusă de o coloană de bule într-un lichid
6. Concluzii

Bibliografie

PARTEA I

1. Introducere

Problema creșterii randamentului la turbomașini este importantă din punctul de vedere al puterii consumate datorită frecării viscoase pe discurile rotoarelor. Pentru evaluarea acestei puteri s-au utilizat atât metode teoretice cât și experimentale fără a se obține însă, până în prezent rezultate unanim acceptate [1], [2]. Cercetările teoretice privind mișcarea indusă de un disc în rotație au ca scop deducerea unei relații de calcul a coeficientului de frecare C_M . Soluțiile sunt obținute prin integrarea ecuațiilor Navier-Stokes în următoarele ipoteze:

- fluid viscos, incompresibil, nelimitat,
- curgere cu simetrie axială, laminară și permanentă,
- valoarea numărului Reynolds critic $Re_{cr} = 3 \cdot 10^5$.

2. Stabilirea condițiilor la limita specifice discului în rotație

Se consideră un disc circular infinit care se rotește cu viteza unghiulară ω constantă, într-un lichid viscos și incompresibil în repaus. Fie un sistem de coordonate cilindric cu axa Oz axa de rotație. Ca urmare a forțelor centrifuge, fluidul este expulzat radial de pe disc ceea ce produce o curgere la mari distanțe, paralelă cu axa Oz , către disc, (fig. 2.1).

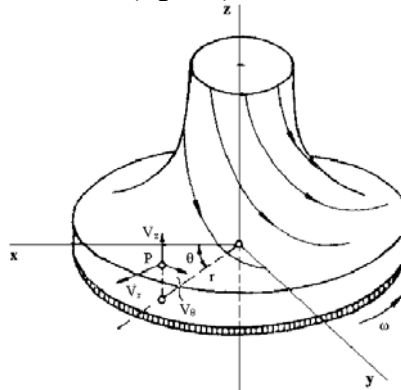


Fig. 2.1. Spectrul curgerii generate de discul în rotație

Mișcarea este cu simetrie axială și permanentă; se neglijează forțele masice și în acest caz ecuațiile Navier-Stokes și ecuația de continuitate (pentru $\rho = \text{ct.}$) devin un sistem nelinier de 4 ecuații diferențiale cu derivate parțiale referitoare la necunoscutele $V_r(r,z)$, $V_\theta(r,z)$, $V_z(r,z)$ și $p(r,z)$, [1], [2]

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \Delta V_r \quad (2.1)$$

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = \nu \Delta V_\theta \quad (2.2)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta V_z \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0. \quad (2.4)$$

Condițiile la limită pentru fluidul în mișcare antrenat de disc, în planul xOy ($z = 0$) sunt:

$$V_r(r,0) = 0, V_\theta(r,0) = \omega r, V_z(r,0) \neq 0 \quad (2.5)$$

$$\text{La mari distanțe, } z \rightarrow \infty \quad V_r(r, \infty) = 0, V_\theta(r, \infty) = 0, V_z(r, \infty) = 0 \quad (2.6)$$

Ultima condiție (2.6) este necesară din considerente fizice. Debitul total de fluid care se scurge dinspre axa de rotație prin suprafața unui cilindru de rază R este

$$Q = 2\pi R \int_0^\infty V_r dz. \quad (2.7)$$

Pentru respectarea legii continuității, aceeași valoare o are și debitul în direcția axei de rotație (deci $V_z < 0$).

3. Integrarea numerică a ecuațiilor Navier Stokes

Dificultățile deosebite legate de rezolvarea ecuațiilor Navier Stokes pentru mișcarea tridimensională a unui fluid viscos, mai ales când valorile mari ale numărului Reynolds favorizează caracterul de instabilitate dat de termenii neliniari, limitează numărul soluțiilor cunoscute până acum la câteva soluții pentru cazuri clasice simple. Sunt și excepții, ca de exemplu [1], [2], fapt ce confirmă calitatea cercetărilor românești.

Se consideră cazul unui disc circular subțire, de rază R , care se rotește cu viteza unghiulară $\omega = \text{ct}$, într-o carcasă cilindrică de înălțime $2B$ (fig. 3.1). Interstițiul e dintre disc și peretele lateral al carcasei fiind mic în raport cu diametrul carcasei, se poate considera $R \sim D/2$, cu D diametrul carcasei.

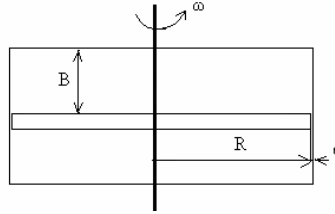


Fig. 3.1. Schița discului montat în carcasă

Se admite că temperatura lichidului viscos și incompresibil se modifică astfel încât să nu se schimbe esențial proprietățile fizice ale acestuia, mișcarea este laminară $Re < Re_{cr} \approx 3 \cdot 10^5$.

Ipoteza temperaturii constante nu se aplică în cazul turațiilor foarte mari (de exemplu 30000 [rot/min]) și a interstițiilor foarte mici (sub 1 mm).

3.1. Transformarea sistemului de ecuații cu derivate parțiale

Se introduce funcția de curent dimensională $\psi(R, Z)$; vitezele au expresiile

$$V_R = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}; \quad V_Z = -\frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R}, \quad (3.1)$$

care asigură satisfacerea ecuației de continuitate, funcția $\psi(R, Z)$ fiind uniformă.

Înlocuind expresiile (3.1) în sistemul de ecuații Navier Stokes în coordonate cilindrice, neglijând forțele masice, acesta devine

$$\begin{aligned} & -\frac{2}{R^2} \Psi_Z'' \Psi_Z'' + \frac{3}{R^3} \Psi_R' \Psi_Z' - \frac{3}{R^2} \Psi_R'' \Psi_Z' + \frac{1}{R^2} \Psi_{RZ}'' \Psi_R' + \frac{1}{R} \Psi_Z' \Psi_{RZ}''' + \frac{1}{R} \Psi_Z' \Psi_{RZ}''' - 2W W_Z' - \frac{1}{R} \Psi_R' \Psi_{RZ}''' - \frac{1}{R} \Psi_R' \Psi_{RZ}''' = \\ & = \nu \left(-\frac{2}{R} \Psi_{RZ}''' + 2\Psi_{RZ}^{IV} + \Psi_{RZ}^{IV} + \Psi_{RZ}^{IV} - \frac{3}{R^3} \Psi_R' + \frac{3}{R^3} \Psi_{RZ}'' - \frac{2}{R} \Psi_{RZ}''' \right) \\ & \quad \frac{1}{R} \Psi_Z' W_R' + \frac{1}{R^2} \Psi_Z' W - \frac{1}{R} \Psi_R' W_Z' = \nu \left(W_{RZ}'' + W_{RZ}'' + \frac{1}{R} W_{RZ}' - \frac{1}{R^2} W \right), \end{aligned} \quad (3.2)$$

unde, pentru simplificare, s-a folosit notația $V_\theta = W$.

3.2. Adimensionalizarea ecuațiilor Navier-Stokes

Folosind avantajul furnizat de o singură rezolvare numerică a tuturor cazurilor de curgere în echipamente cu geometrie similară, unde mișcarea depinde astfel doar de Re , se aleg caracteristicile: diametrul interior al cilindrului D și viteza periferică a discului $U = \pi D_d n / 60$. Astfel, se notează

$$z = \frac{Z}{D}; \quad r = \frac{R}{D}; \quad \tau = \frac{T}{D} = \frac{R\theta}{D} = r\theta; \quad v_r = \frac{V_R}{U} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad v_z = \frac{V_Z}{U} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad w = \frac{V_\theta}{U}, \quad (3.3)$$

$$\text{cu } T = R\theta \text{ deplasarea pe disc, unde s-a considerat că } \psi = \frac{\Psi}{UD^2} \text{ și } Re = \frac{\omega R^2}{\nu}. \quad (3.4)$$

Cu aceste notații, ecuațiile (3.2) devin ecuațiile adimensionale ale ecuațiilor N-S.

$$Re \left(-\frac{2}{r^2} \psi_z' \psi_z'' + \frac{3}{r^3} \psi_r' \psi_z' - \frac{3}{r^2} \psi_r'' \psi_z' + \frac{1}{r^2} \psi_{rz}'' \psi_r' + \frac{1}{r} \psi_z' \psi_{rz}''' + \frac{1}{r} \psi_z' \psi_{rz}''' - 2w w_z' - \frac{1}{r} \psi_r' \psi_{rz}''' - \frac{1}{r} \psi_r' \psi_{rz}''' \right) =$$

$$= -\frac{2}{r}\psi_{rz^2}^{III} + \psi_r^{IV} + 2\psi_{r^2z^2}^{IV} + \psi_z^{IV} - \frac{3}{r^3}\psi_r^I + \frac{3}{r^2}\psi_r^{II} - \frac{2}{r}\psi_{r^3}^{III}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\text{Re}}{r} \left(\psi_z^I w_r^I + \frac{1}{r} \psi_z^I w - \psi_r^I w_z^I \right) = w_{r^2}^{II} + w_{z^2}^{II} + \frac{1}{r} w_r^I - \frac{1}{r^2} w. \quad (3.6)$$

3.3. Metoda dezvoltărilor în serii Taylor finite. Calculul derivatelor parțiale

Pentru a rezolva sistemul de ecuații neliniare cu derivate parțiale s-a folosit metoda dezvoltărilor în serii Taylor [3], admițând că în fiecare punct $0(r_0, z_0)$ din interiorul domeniului ocupat de fluid, ambele funcții necunoscute $\psi(r, z)$ și $w(r, z)$ satisfac anumite condiții de regularitate și anume sunt continue, uniforme și au derivate de până la ordinul 2, respectiv 4. Rezultă pentru pas simplu $\chi[1]$

$$\psi_{1,3} \approx \psi_0 \pm \chi \psi_r^I + \frac{\chi^2}{2} \psi_r^{II} \pm \frac{\chi^3}{6} \psi_r^{III} + \frac{\chi^4}{24} \psi_r^{IV} \quad (3.7)$$

$$\psi_{2,4} \approx \psi_0 \pm \chi \psi_z^I + \frac{\chi^2}{2} \psi_z^{II} \pm \frac{\chi^3}{6} \psi_z^{III} + \frac{\chi^4}{24} \psi_z^{IV}$$

până la $\psi_{14, 16}$.

$$w_{1,3} \approx w_0 \pm \chi w_r^I + \frac{\chi^2}{2} w_r^{II} \quad (3.8)$$

$$w_{2,4} \approx w_0 \pm \chi w_z^I + \frac{\chi^2}{2} w_z^{II},$$

și similar pentru pasul dublu (2χ).

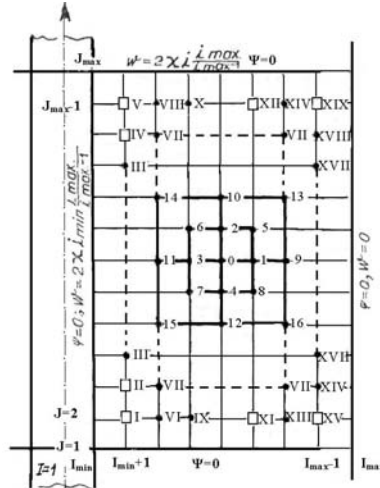


Fig.3.2. Rețeaua pătratică asociată domeniului de curgere

Se acoperă domeniul de curgere cu o rețea pătrată de pas $\chi = \frac{\delta R}{D} = \frac{\delta Z}{D} < 1$. Această alegere s-

a făcut datorită formei simetrice a ecuațiilor în ceea ce privește ordinul maxim al derivatelor parțiale și pentru a nu favoriza nici una dintre cele două direcții în ceea ce privește stabilitatea soluției numerice. Prin calcul, din relațiile (3.7) se pot exprima derivatele parțiale ale celor două funcții din sistemul (3.5), (3.6) ca funcții de valorile $\psi_{1 \div \psi_{16}}$ și $w_{1 \div w_4}$ atribuite nodurilor din apropierea punctului 0.

$$\psi_r^I = \frac{1}{\chi} \left[\frac{2}{3} (\psi_1 - \psi_3) + \frac{1}{12} (\psi_{11} - \psi_9) \right] = -rv_z,$$

$$w_r^I = \frac{1}{2\chi} (w_1 - w_r), \quad w_z^I = \frac{1}{2\chi} (w_2 - w_4), \quad w_{r^2}^{II} + w_{z^2}^{II} = \frac{1}{\chi^2} \left(\sum_{i=1}^4 w_i - 4w_0 \right) \quad (3.9)$$

Înlocuind expresiile cu derivate parțiale (3.9) în sistemul de ecuații (3.5), (3.6) și luând în considerare că $r = i\chi$, ca și notația $k = \chi/r = 1/r$, se obțin relațiile algebrice asociate,

$$w_0 = \frac{1}{4+k^2 + \frac{\text{Re}k}{12} [8(\psi_2 - \psi_4) + \psi_{12} - \psi_{10}]} \left\{ \sum_{i=1}^4 w_i + \frac{k}{2} (w_1 - w_3) + \frac{\text{Re}}{24r} [8(\psi_1 - \psi_3) + \psi_{11} - \psi_9] (w_2 - w_4) - [8(\psi_2 - \psi_4) + \psi_{12} - \psi_{10}] (w_1 - w_3) \right\} \quad (3.10)$$

reprezentând prima formă a **relației algebrice asociate** sistemului 3.5 și 3.6.

4. Stabilirea soluției numerice

4.1 Tratarea nodurilor speciale

Figura 3.2 reprezintă valorile funcțiilor ψ și w pe limitele domeniului pătratic, luând în considerare aspectul curgerii hidrodinamice și condiția de aderență a fluidului la pereții solizi. Pentru a trata aceste punctele singulare de prima speță se folosește așa numita *condiție a reflectării* ($\psi_1 \approx \psi_3$ pentru pereți verticali și $\psi_2 \approx \psi_4$ pentru pereți orizontali) dedusă din relațiile (3.7), în ipoteza aderenței fluidului viscos la pereții solizi. *Punctele speciale de a doua speță*, marcate în figura 3.2. cu un pătrat, apar în colțurile domeniului și în vecinătatea discului și a carcsei.

4.2 Deducerea relației algebrice asociate

Cu ajutorul acestor relații se stabilește o nouă formă a relației algebrice ce dă valoarea funcției de curent ψ în nodurile XV și XIX

$$\begin{aligned} \psi_0 = & \left\{ 10 + \frac{15}{2}k^2 + \frac{25}{24} \frac{\text{Re } k}{r} \left[\frac{24}{5}(\psi_1 + \psi_6 - \psi_3 - \psi_8) + \frac{3}{5}(\psi_{11} - \psi_{16} - \psi_9 - \psi_{14}) + \frac{4}{5}(\psi_3 - \psi_1) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{10}(\psi_9 - \psi_{11}) \right] \right\}^{-1} \cdot \left\{ 8(\psi_2 + \psi_4) - 2(\psi_5 + \psi_8) + 16\psi_3 - 10(\psi_6 + \psi_7) + \psi_9 + \psi_{14} + \psi_{15} - \psi_{11} + \right. \\ & \left. + k \left[4(\psi_3 - \psi_1) + \psi_6 + \psi_7 + \psi_{11} - \psi_5 - \psi_8 - \psi_9 \right] + k^2 \left[4(\psi_1 + \psi_3) - \frac{1}{4}(\psi_9 + \psi_{11}) \right] + \right. \\ & \left. + k^3 \left[2(\psi_3 - \psi_1) + \frac{1}{4}(\psi_9 - \psi_{11}) \right] + \frac{\text{Re}}{3r} \left[\left[2(\psi_1 - \psi_3) + \frac{1}{2}(\psi_6 + \psi_7 + \psi_{11} - \psi_5 - \psi_8 - \psi_9) \right] \cdot \right. \right. \\ & \left. \left[2(\psi_1 + \psi_6 - \psi_3 - \psi_8) + \frac{1}{4}(\psi_{11} + \psi_{16} - \psi_9 - \psi_{14}) \right] + \left[2(\psi_1 - \psi_3) + \frac{1}{4}(\psi_{11} - \psi_9) \right] \cdot \left[2(\psi_2 - \psi_4) + \right. \right. \\ & \left. \left. + 4(\psi_3 + \psi_8 - \psi_1 - \psi_6) + \frac{1}{2}(\psi_5 + \psi_6 + \psi_7 + \psi_{14} - \psi_7 - \psi_8 - \psi_{11} - \psi_{16}) \right] + k \left[2(\psi_3 + \psi_6 - \psi_3 - \psi_8) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{4}(\psi_{11} + \psi_{16} - \psi_9 - \psi_{14}) \right] \cdot \left[\frac{8}{3}\psi_1 + \frac{2}{3}(\psi_5 + \psi_8) + 2(\psi_6 + \psi_7) - \frac{1}{4}\psi_9 + \frac{1}{12}\psi_{11} - \frac{1}{6}(\psi_{14} + \psi_{15}) \right] + \right. \\ & \left. + \left[2(\psi_3 - \psi_1) + \frac{1}{4}(\psi_9 - \psi_{11}) \right] \cdot \left[\frac{2}{3}(\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 - \psi_6 - \psi_8) + \frac{1}{24}(\psi_{14} + \psi_{16} - \psi_9 - \psi_{10} - \psi_{11} - \psi_{12}) \right] \right\} + \\ & \left. + k^2 \left[2(\psi_3 - \psi_1) + \frac{1}{4}(\psi_9 - \psi_{11}) \right] \left[2(\psi_1 + \psi_6 - \psi_3 - \psi_8) + \frac{1}{4}(\psi_{11} + \psi_{16} - \psi_9 - \psi_{14}) \right] + 3r^4 k^3 w_0 (w_2 - w_4) \right\} \quad (4.1) \end{aligned}$$

unde s-a introdus notația $k = \chi/r$. Relația 4.1 se va utiliza pentru integrarea numerică a ecuațiilor Navier-Stokes, pentru a obține soluții ale curgerii induse de un disc în rotație într-o carcasă.

5. Concluzii

1. Aceste rezultate urmează a fi finalizate printr-un program de calcul numeric al coeficientului de frecare C_M .
2. Determinarea coeficientului momentului de frecare pe discuri în rotație, depinde de numărul Re al mișcării induse, turație, gabarite, rugozitatea suprafețelor și distanța între disc și carcasă B/R.
3. În prezentul raport științific se prezintă soluțiile analitice pentru determinarea coeficientului C_M și se analizează condițiile la limită utilizate, domeniul de valabilitate al soluțiilor.
4. Problema determinării puterii consumate datorită frecării viscoase pe discuri în rotație continuă să fie o problemă actuală, mai ales dacă viteza de rotație a acestora este mare.
5. Soluțiile analitice și numerice obținute pentru fluid viscos incompresibil, nelimitat sunt utilizate la compararea cu rezultate experimentale care le confirmă diferențiat, în funcție de numărul Reynolds, [3]. Astfel pentru $\text{Re} = 10^4 \div 10^5$ rezultatele experimentale publicate pentru coeficientul C_M sunt mai mari cu $20 \div 30\%$; în zona Reynolds critic $\text{Re}_{cr} = 3 \cdot 10^5$ există o dispersie a acestora (valorile diferă ca ordin de mărime), iar la $\text{Re} > \text{Re}_{cr}$ sunt de asemenea mai mari.

PARTEA A II-A

1. Modelarea curgerilor bifazice. Prezentare generală

Pentru studiul curgerilor bifazice se utilizează adesea simulările numerice. În ultimele două decenii simularea curgerilor multifazice a înregistrat un progres semnificativ.

În prezentul raport, se studiază simularea curgerilor bifazice (aer-apă) cu ajutorul CFD. Cele mai utilizate modele pentru simularea curgerilor generate de coloane de bule sunt: modelul *Euler-Euler* (Pan et al., 1999) și modelul *Euler-Lagrange* (Delnoij et al., 1997). Ambele modele prezintă avantaje și dezavantaje, specifice domeniului de aplicabilitate.

În modelul Euler – Lagrange este urmărită fiecare bulă în parte în timp ce faza lichidă este tratată ca un mediu continuu. În modelul Euler-Euler, ambele faze sunt tratate independent, ca fluide care nu interacționează. Pentru descrierea celor două faze în timp se utilizează ecuațiile mediate pentru masă și moment. Pentru simularea curgerii induse de o coloană de bule în lichid s-a utilizat modelul de simulare Euler-Euler. Avantajul utilizării acestuia este sesizabil atunci când fracția de goluri a fazei disperse este mare; dacă s-ar folosi modelul Lagrangian, pentru urmărirea individuală a tuturor bulelor ar fi necesar un timp de calcul mult mai mare. Ecuația de conservare a masei neglijând transferul de masă interfazic este dată de relația
$$\frac{\partial}{\partial t}(r\rho)_\alpha + \nabla(r\rho\mathbf{u})_\alpha = 0 \quad (1.1)$$

unde t reprezintă timpul, r – fracția volumică, ρ – densitatea fazei iar α indică tipul fazei.

2. Geometria domeniului în cazul studiului mișcării induse de o coloană de bule

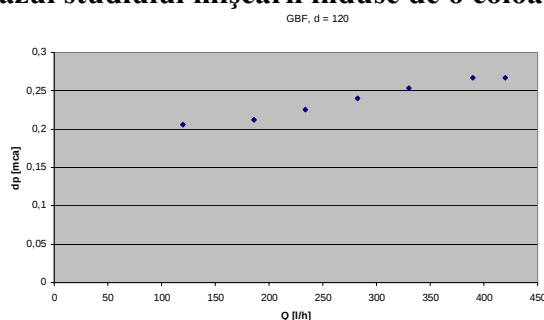
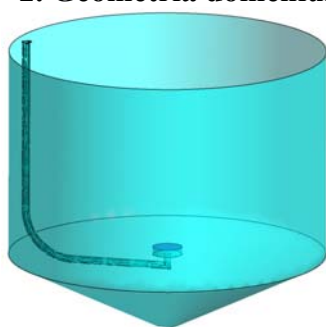


Fig. 2.1, Geometria domeniului

Fig. 2.2, Variația căderii de presiune în funcție de debit pt GB

S-a ales geometria din figura 2.1 care respectă următoarele condiții:

- Bazinul are formă cilindrică (pentru studiul axial-simetric al câmpului de viteze induse); continuă cu un con sub generatorul de bule pentru a verifica existența mișcării induse sub nivelul acestuia;
- Raportul între diametrul bazinului și diametrul generatorului de bule $D/d \approx 11$ reduce influența pereților asupra câmpului de viteze induse de coloana de bule
- Sarcină hidrostatică $H = 850$ mm care asigură studiul evoluției pe verticală a coloanei de bule.
- Generatorul de bule (GB) utilizat pentru dispersia aerului în lichid caracteristicile: diametrul $d = 120$ mm, porozitatea de $250 \div 315$ μm , căderea de presiune reprezentată în figura 2.2

3. Discretizarea domeniilor de curgere

Discretizarea domeniului de curgere s-a făcut utilizând Metoda Volumului Finit. (MVF). Patrulateralele obținute printr-o astfel de discretizare reprezintă celulele de calcul. În MVF forma integrală a ecuațiilor de conservare este aplicată unui volum de control definit de o celulă pentru a obține ecuațiile aferente celulei. Forma integrală a ecuației de continuitate în cazul mișcării permanente a unui fluid incompresibil este dată de relația:

$$\int_S \vec{V} \cdot \hat{n} \cdot dS = 0 \quad (3.1)$$

unde S reprezintă frontiera volumului de control și n normala exterioară la suprafață.

Pentru o celulă (fig. 3.1), viteza pe fața i este: $\vec{V}_i = u_i \hat{i} + v_i \hat{j}$. Aplicând ecuația (3.1) volumului de control definit de celulă rezultă:

$$-u_1 \Delta y - v_2 \Delta x + u_3 \Delta y + v_4 \Delta x = 0 \quad (3.2)$$

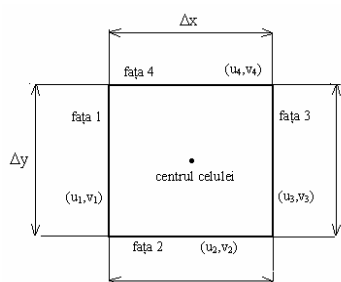


Fig. 3.1, Schița celulei de discretizare

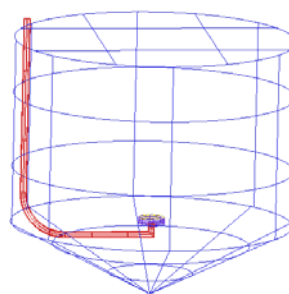


Fig. 3.2, Geometria domeniului de curgere

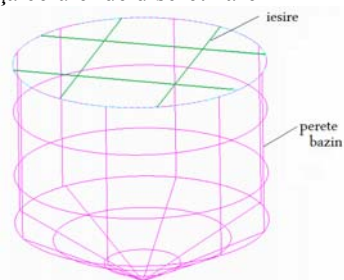


Fig. 3.3, Schema părților ieșire și perete_bazin

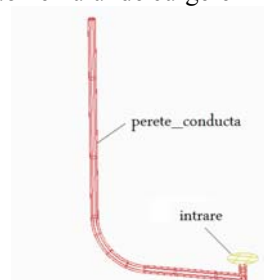


Fig. 3.4, Schema părților intrare și perete conductă

Relația (3.2) reprezintă forma discretizată a ecuației de continuitate pentru celula considerată. Valorile vitezelor u_1, v_2 etc. se obțin prin interpolarea valorilor din centrul celulelor adiacente.

Geometria din fig. 3.2 a fost discretizată cu metoda MVF în CFX obținându-se o rețea (mesh) cu 1259918 elemente tetraedrice și 213986 noduri

La importarea geometriei (fig. 3.2), în programul de creare a mesh-ului sunt definite două tipuri de entități: *Geometry (pct, curbe, suprafețe)* și *Parts*

Dimensiunea maximă a elementelor de discretizare (tetraedrice) la peretele bazinului este de 10 mm. În jurul generatorului de bule s-a ales o discretizare mai fină a domeniului de curgere (1,25 mm) pentru o analiză mai detaliată a fenomenelor aferente generării bulelor. Rețeaua a fost rafinată în jurul conductei de injecție a aerului pentru a analiza influența acestuia asupra curgerii induse în lichid.

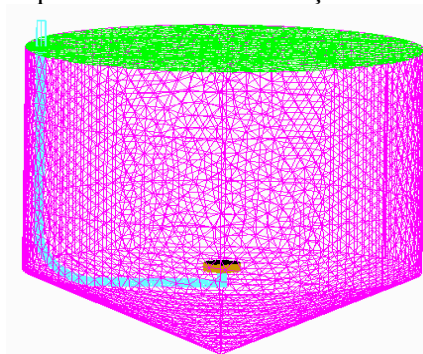


Fig. 6, Discretizarea mesh-ului domeniului de curgere în cazul mișcării induse de coloana de bule

Raportul de racordare a dimensiunilor între elementele de discretizare (tetra size ratio) a fost de 1,4 în jurul conductei de alimentare cu aer și 1,2 la intrarea aerului și pe peretele bazinului.

4. Integrarea numerică a ecuațiilor Navier Stokes

4.1. Reducerea sistemului de ecuații cu derivate parțiale. Ecuațiile RANS

Pentru modelarea curgerii induse de o coloană de bule în mediul lichid trebuie rezolvate în CFD ecuațiile Navier-Stokes mediate – ecuațiile RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes). Acestea reprezintă mișcarea fluidului mediată în timp și se utilizează atunci când se dorește modelarea curgerilor turbulente. Valoarea mediată $\bar{X}$ a unei mărimi x este definită de

$$\bar{X} = \lim_T \lim_{\infty} \int_{t_0}^{t_0+T} x dt . \quad (4.1)$$

Pentru a fi un termen bine stabilit, $\bar{X}$ trebuie să fie independent de condiția inițială la t_0 . Presupunând că limita există, atunci există un anumit T astfel încât integrarea de la t_0 la T este în mod arbitrar foarte aproape de medie. Aceasta înseamnă că dând valori tranzitorii într-un timp suficient de mare, media poate fi calculată numeric cu o eroare mică. Oricum, nu există o modalitate analitică de a obține limita superioară T .

Pentru mișcarea permanentă a unui fluid newtonian incompresibil se poate scrie:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (4.2)$$

Membrul stâng al ecuației (4.2) reprezintă schimbul mediu de moment al elementului fluid datorat nepermanenței mișcării medii a fluidului și a convecției. Acest schimb este echilibrat de forța gravitațională medie, de termenul izotrop datorat câmpului mediu de presiuni, de frecarea viscoasă și cea aparentă ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$) datorată fluctuațiilor câmpului de viteze; acești termeni sunt denumiți generic *Reynolds stresses*.

4.2 Deducerea relației algebrice asociată ecuației cu derivate parțiale

Pentru derivarea ecuațiilor RANS este necesară separarea variabilelor curgerii (cum ar fi viteza u) în componente medii (medie în timp) ($\bar{u}$) și fluctuații de viteză (u'). Prin definiție media pulsațiilor vitezei este zero ($\overline{u'} = 0$). Astfel, viteza se descompune după relația

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (4.3)$$

unde $x = (x, y, z)$ este vectorul de poziție, u reprezintă viteza $\bar{u}$ valoarea medie a acesteia și u' fluctuația vitezei.

Substituind $u_i = \bar{u}_i + u'_i$, $p = \bar{p} + p'$ etc. în ecuațiile (4.3), ecuațiile Navier-Stokes pentru un fluid newtonian incompresibil scrise tensorial devin

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial (\bar{u}_i + u'_i)}{\partial t} + (\bar{u}_i + u'_i) \frac{\partial (\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} &= (\bar{f}_i + f'_i) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 (\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j \partial x_j} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Mediind după timp aceste ecuații, simplificând termenii neliniari și efectuând calculele se obține

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right], \quad (4.5)$$

unde $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ reprezintă rata medie a tensorului de deformare.

Cum integrarea înlătură dependența de timp, ecuația se reduce la ecuația cu derivate parțiale (4.6)

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]. \quad (4.6)$$

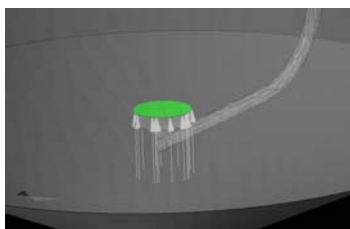
5. Condițiile la limită pentru curgerea indusă de o coloană de bule într-un lichid

Tip condiții la limită

Schiță

Setari

Intrare



Fluid bifazic

Regim curgere = Subsonic, Intensitatea turbulenței 5%

Aer

Debit masic = $8,54 \cdot 10^{-5}$

kg/s;

Fracția volumică = 0,7

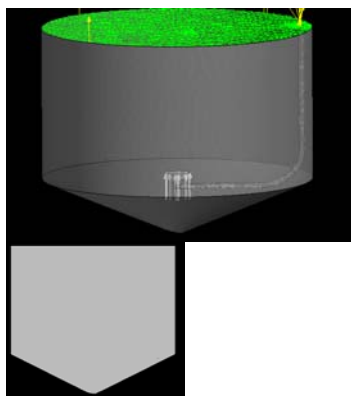
Apă

Viteza normală la

suprafața de intrare = 0

Fracția volumică = 0,3.

Ieșire aer



Regim curgere = Subsonic
Condiția de degazare

Perete

Perete neted
Viteză zero la perete (no slip)

6. Concluzii

Pentru simularea curgerii induse de o coloană de bule într-un lichid în repaus s-a utilizat modelul de simulare numerică Euler-Euler din CFD, favorabil datorită faptului că ambele faze (lichidă și gazoasă) sunt tratate independent, iar fracția de goluri a fazei disperse este mare (modelul Lagrangian urmărește bulele individual și necesită un timp de calcul considerabil mai mare).

S-a ales geometria de curgere, care s-a discretizat utilizând MVF. În jurul elementelor de interes (generatorul de bule, conducta de injecție a aerului) s-a ales o discretizare mai fină a domeniului de curgere (dimensiunea maximă a elementelor mesh-ului de 1,25 mm față de 10 mm în rest) pentru o analiză mai detaliată a fenomenelor fizice aferente generării bulelor și a curgerii induse.

S-au ales condițiile la limită favorabile curgerii prezentate.

Debitul masic impus ca și condiție de intrare se va utiliza în cercetările experimentale privind mișcarea indusă de coloana de bule, din etapa 3 a proiectului în scopul validării rezultatelor teoretice.

Bibliografie selectivă

Partea I – disc în rotație –

- 1 Constantinescu V.N., *Dinamica fluidelor viscoase incompresibile*, Ed. Academiei, Bucuresti, 1987.
2. Oroveanu T., *Mecanica fluidelor viscoase*, Ed. Academiei, București, 1967.
3. Schlichting H, Gerten K, *Boundary layer theory*, 8th Revised and Enlarged Edition, Springer, Bochum, 1999.
4. Cazacu M.D., Petcu M., Bănescu A., *Axisymmetrical motion of the viscous liquid in the disk mill*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Mec. Appl., Tome 33, nr. 2, 1988, p. 159-184.
5. Hütte, *Manualul inginerului. Fundamente*, Ed. Tehnică, București, 1995.
6. Neașu R., Băran G., Ciocănea A., *Studiul mișcării lichidului viscos între rotorul și carcasa unei turbomașini*, A 2-a Conf. a Hidroenergeticienilor din România Dorin Pavel, Bucuresti, p. 561-568, mai, 2002.
7. Bunea Florentina, Cazacu M.D., *Numerical solve of permanent laminar two-dimensional flow at the entrance into a channel*, U.P.B., Sci. Bull., Series D, Vol. 65, No. 1, 2005.
8. Roman P., Băran Gh., Florea Mariana, *Asupra coeficientului de frecare viscoasă pe discuri circulare în rotație*, Hidrotehnica, V. 44, nr. 1-2, p. 3-5, 1999.
9. Stava P., Zaponel J., Wagnerova, Zubik P., *Investigation of instabilities during transition from laminar to turbulent flow in the gap between two concentric discs, one rotating, by methods of nonlinear dynamics*, Strojnický časopis, 2004, p100-118,
10. Ciocănea A., Neașu R., *Soluții numerice în termo-hidrodinamică*, Ed. Dacia Cluj-Napoca, ISBN 973-35-1368-7, 2002, 212p
11. Florea M., Referat Dr.I., *Stadiul actual al cercetarilor privind frecarea viscoasă pe un disc în rotație*, Decembrie 2007.
12. Florea Mariana. *Coeficientul de frecare viscoasă la discuri în rotație uniformă*. Lucrările celei de a 4 – a Conferințe a hidroenergeticienilor din România, București, mai 2006, V.I., pag. 1-8,
13. Ciocănea A., Florea Mariana, Băran N., Băran Gh., *Experimental Research Regarding Viscous Friction on Rotating Disks*, Revista de Chimie (București) Vol.58, nr.12, 2007.
14. Florea Mariana, Băran Gh., Panaitescu V., *About viscous dissipation on the disks of turbomachines rotors*, U. P. B.Sci.Bull., Series D, Vol. 70, No. 2, 2008, pag. 85-92.

Partea a II-a – coloană de bule –

1. Pan Y., Dudukovic M.P. and Chang M., Dynamic simulation of bubbly flow in bubble columns, *Chemical Engineering Science* **54** (1999), pp. 2481–2489.
2. Sokolichin A. and Eigenberger G., Applicability of the standard turbulence model to the dynamic simulation of bubble columns: Part I, *Detailed numerical simulations. Chemical Eng. Science* **52** (1999), pp. 611–626.
3. Torvik R. and Svendsen H.F., Modelling of slurry reactors. A fundamental approach, *Chemical Engineering Science* **45** (1990), pp. 2325–2332.
4. Delnoij E., Kuipers J. A.M. and Van Swaaij W. P.M., Dynamic simulation of gas–liquid two-phase flow: effect of column aspect ratio on the flow structure, *Chemical Engineering Science* **52** (1997), pp. 3759–3772.
5. Van den Hengel E.I.V., Deen N.G. and Kuipers J. A.M., Application of coalescence and breakup models in a discrete bubble model for bubble columns, *Industrial Eng. Chemistry and Research* **44** (2005), pp. 5233–5245.
6. Darmana D., Deen N.G. and Kuipers J.A.M., Detailed modeling of hydrodynamics, mass transfer and chemical reactions in a bubble column using a discrete bubble model, *Chemical Eng. Science* **60** (2005), pp. 3383–3404.

7. Becker S., Sokolichin A. and Eigenberger G., Gas-liquid flow in bubble columns and loop reactors: Part II. Comparison of detailed experiments and flow simulations, *Chemical Eng. Science* **49** (1994), pp. 5747–5762.
8. Viollet P.L. and Simonin O., Modeling dispersed two-phase flows: closure, validation and software development, *Applied Mechanical Reviews* **47** (1994), p. S80.
9. Pfleger D. and Becker S., Modeling and simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column, *Chemical Engineering Science* **56** (2001), pp. 1737–1747.
10. Borchers, O., Busch, C., Eigenberger, G., Applicability of the standard k-e turbulence model to the dynamic simulation of bubble columns. *Chemical Engineering Science* **54**, (1999), 5927–5935.
11. Deen N.G., Solberg T. and Hjertager B.H., Large eddy simulation of the gas-liquid flow in a square cross-sectioned bubble column, *Chemical Engineering Science* **56** (2001), pp. 6341–6349.
12. Milelli M., Smith B.L. and Lakehal D., Large-eddy simulation of turbulent shear flows laden with bubbles. Editors, *Direct and Large-Eddy Simulation IV*, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam (2001), pp. 461–470.
13. Lakehal D., Smith B.L. and Milelli M., Large-eddy simulation of bubbly turbulent shear flows, *Journal of Turbulence* **3** (2002), pp. 1–21.
14. Oey R.S., Mudde R.F. and Van Den Akker H.E.A., Sensitivity study on interfacial closure laws in two-fluid bubbly flow simulations, *A.I.Ch.E. Journal* **49** (2003), pp. 1621–1636.



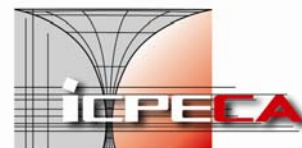
INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE - DEZVOLTARE
PENTRU INGINERIE ELECTRICĂ ÎNCALC ÎCPE-CA



Nr. Registrul Comerțului
J40/3800/2001
Cod Fiscal R 13827850
Capital Social: 381.108 Lei
Treasury:
R056TREZ7035069XXX001105

Cont : ROL
R052RNCB0076029424690001
BCR Sucursala Sector 5, București
Splaiul Unirii nr. 313, sector 3
București, 030138, România

Email: office@icpe-ca.ro
Tel: +4021.346.7231
+4021.346.8297
Fax: +4021.346.8299



Autoritate Contractantă - CNCSIS

SINTEZA LUCRĂRII

CURGERI AXIAL SIMETRICE INDUSE

**IDEI ID_25
NR. 232/2007**

ETAPA finală/2009

Director General

Prof. dr. fiz. Wilhelm KAPPEL

Director proiect

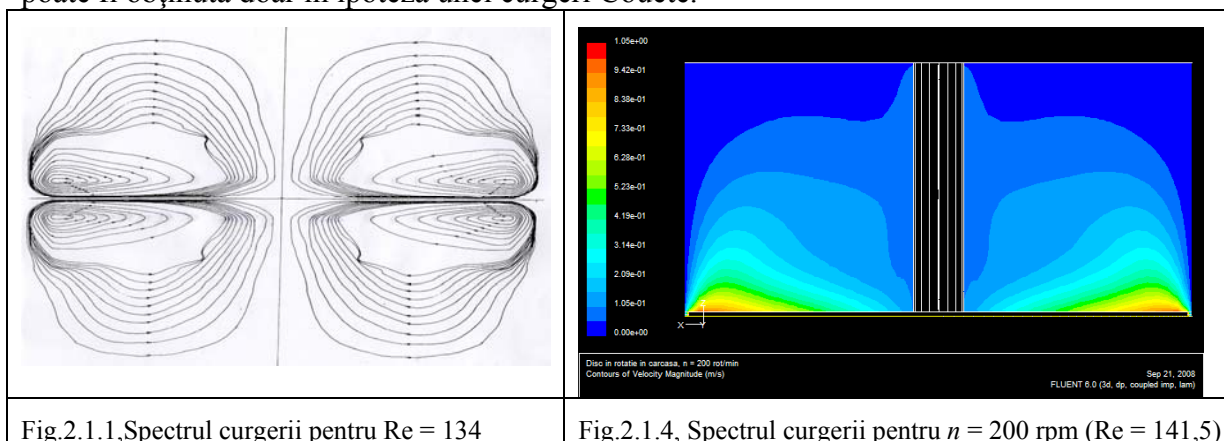
dr.ing. Florentina BUNEA

CUPRINSUL LUCRĂRII

1. Măsurarea puterii mecanice consumate pe frecare vâscoasă și determinarea coeficienților $C_M = f(\text{Re})$
 - 1.1. Cercetări teoretico – experimentale publicate, asupra frecării viscoase pe un disc în rotație
 - 1.2. Măsurarea puterii mecanice consumate pe frecare vâscoasă. Instalația experimentală
 - 1.3 Determinarea experimentală a coeficienților momentului de frecare în funcție de numărul lui Reynolds, $C_M = f(\text{Re})$
 - 1.3.1 Compararea rezultatelor experimentale cu rezultatele teoretice
 - 1.4 Concluzii privind coeficientul momentului de frecare asupra numărului Re
2. Influența distanței între disc și carcasă asupra eforturilor de frecare vâscoasă
3. Studiul stabilității coloanelor de bule fine în funcție de debitul de aer și sarcina hidrostatică
4. Determinarea fracției de goluri locale și /sau globale
 - 4.1. Metode de măsurare a parametrilor hidrodinamici în instalații cu fluide de lucru bi și trifazice
 - 4.2. Definirea parametrilor
 - 4.3. Determinarea experimentală a fracției de goluri globale
 - 4.3.1. Modul de lucru
 - 4.3.2. Rezultate și discuții
 - 4.4 Concluzii privind fracția de goluri
5. Punerea în funcțiune a dispozitivului de determinare a vitezelor. Cercetări preliminare privind curgerea indusă
6. Concluzii generale
7. Criterii de performanță
8. Bibliografie

În cadrul **etapei intermediare** / 2009 s-au urmărit două obiective: alegerea fluidelor de lucru pentru cazul discului în rotație și soluționarea numerică pentru cele două probleme propuse.

Pentru alegerii fluidelor de lucru s-au determinat experimental densitatea și viscozitatea cinematică a patru tipuri de uleiuri (MK 8, AIR 3514, H42, SR211) și s-au trasat diagramele în funcție de temperatură. Cele patru lichide de lucru acoperă un interval de viscozități cinematice cuprins între $13 \cdot 10^{-6}$ și $370 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]. De asemenea s-au stabilit zonele de interes pentru numărul Reynolds în cazul curgerii unui disc aflat în mișcare de rotație, respectiv zona $Re_{cr} = (1 \div 3) \cdot 10^5$, unde rezultatele din literatură au o dispersie mare. În literatura de specialitate, [Schlichting și Gerten, 1999], [Florea, 2009], [Florea și colab., 2008], [Neacsu și colab., 2002], nu sunt prezente cercetări experimentale în domeniul $Re < 5 \cdot 10^3$, iar rezultatele teoretice prezentate reprezintă doar o aproximație a fenomenului, ilustrată și prin spectrul propus al curgerii (fig.2.1.1). Relația analitică propusă în literatura, poate fi obținută doar în ipoteza unei curgeri Couete.



Rezultă astfel un interval de numere $Re = 10^3 \div 10^7$ asigurat atât lichidele de lucru cu viscozități și densități diferite, cât și de turație ($n = 25 \div 1500$ rpm), limitată la 1500rpm deoarece la turații mai mari, temperatura lichidului variază cu mai mult de 1°C.

S-au realizat simulările numerice pentru cele două probleme propuse folosind pe geometriile obținute în etapa anterioară, geometrii care reprezintă instalațiile experimentale pe care se vor realiza măsurătorile.

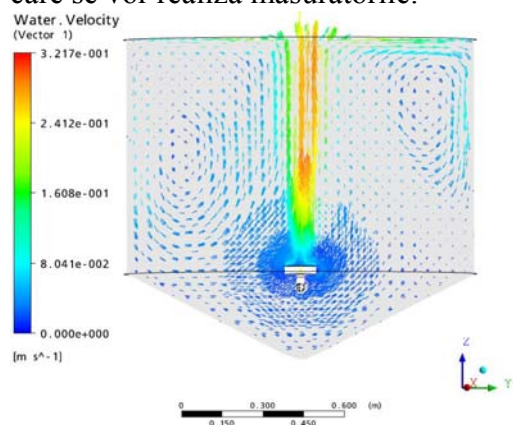


Fig. 2.2.3, Vitezele induse ale apei în domeniul analizat

- Pentru *curgerea indusă de un disc* s-a obținut spectrul curgerii induse pentru diferite numere Reynolds și turații cuprinse între 25÷1000 rpm (de ex. fig. 2.1.5), și s-a observat o accelerare a vitezei de curgere a lichidului în vecinătatea discului și mai intense către periferie și o frânare în zona capacelor.
- Pentru *curgerea indusă de o coloană de bule* s-a obținut spectrul vectorilor de viteze induse al apei de către coloana de bule. S-au creat un plane care intersectează domeniul de curgere în care s-au reprezentat vitezele sub formă de vectori.

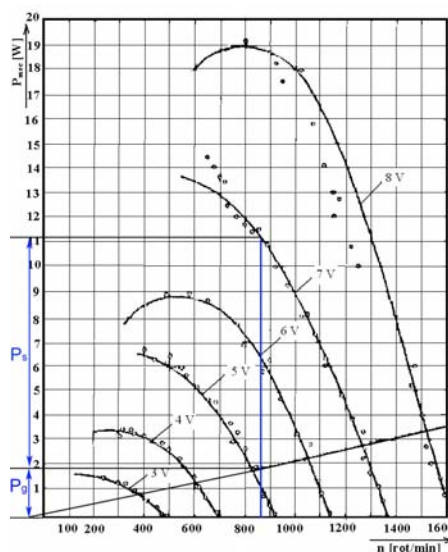
Din figura 2.2.3 se poate vizualiza antrenarea apei din bazin și recircularea acesteia, rezultat obținut și în alte studii de specialitate [Shevchuk, 2007]. Se observă că:

- De la un anumit debit (numit debit de stabilitate și care depinde de natura generatorului de bule) curgerea nu mai este axial simetrică atât datorită oscilației coloanei de bule cât și a modificării formei acesteia.
- Viteza maximă indusă s-a obținut în centrul coloanei de bule $v_{max} = 0,3217$ m/s. Această viteză este de același ordin de mărime cu viteza ascensională a bulelor: $0,15 \div 0,40$ m/s pentru bule cu diametrul de $1 \div 3$ mm.

Etapa finală /2009 are ca obiectiv - punerea în funcțiune a instalațiilor experimentale; măsurători experimentale.

Pentru determinarea puterii consumate prin frecare viscoasă și a coeficienților momentului de frecare C_M , în cazul *discului aflat în rotație*, se prezintă (după mai mulți autori) atât cazul dicurilor libere cât și în carcasă, în regim laminar și turbulent. Relațiile de calcul propuse presupun că valorile C_M depind de numărul Reynolds - care intervine în stabilirea domeniului de aplicare a relației respective.

Problema pierderilor prin frecare viscoasă la un disc în rotație este studiată [Hamkins, 2000] în special datorită aplicațiilor directe la rotoarele turbomasinilor. Pierderea prin frecarea viscoasă are un impact important asupra eficienței mașinilor centrifuge cu turație mică [Gulich, 2003] (pentru $n = 10$ rpm, puterea pierdută prin frecarea pe disc $P \approx 50\%$ și pentru $n = 30$ rpm, $P \approx 5\%$). Investigațiile au arătat că, frecarea pe disc și curgerea în interiorul rotorului depind de următorii parametri: Re, rugozitatea suprafeței, direcția și debitul curgerii (între disc și carcasă), viteza absolută cu care curgerea dintre disc și carcasa antrenează restul curgerii în rotor și geometria curgerii. Frecarea la perete pe corpul în rotație antrenează lichidul iar forțele centrifuge din straturile limită ale discului creează o mișcare a fluidului, între disc și carcasa (camera rotorului). Rotația fluidului determină distribuția de presiune între rotor și coroană și influențează forțele axiale pe rotor.



presiune între rotor și coroană și influențează forțele axiale pe rotor.

Instalația experimentală pentru măsurarea C_M , este alcătuită dintr-un disc subțire (1 mm) și neted, cu raza $R = 50$ mm, montat pe un arbore cu diametru $d = 10$ mm într-o carcasă cilindrică cu înălțimea $2B = 100$ mm. Raportul $B/R = 1$, poate fi micșorat, prin micșorarea înălțimii B , de exemplu prin fixarea unor plăci circulare pe capacele carcasei. Carcasa are două zone transparente care asigură vizualizarea curgerii. Turația este variabilă și se reglează din tensiunea aplicată motorului. La instalația de lucru se atașează aparatura de măsură și control: voltmetru, ampermetru, sursa stabilizatoare de c.c., traductoare de turație și de temperatură și un sistem de afișare și stocare a mărimilor măsurate.

Fig. 1.3, Diagrama de tarare a motorului de curent continuu

Pentru determinarea C_M (1.17) este necesară măsurarea momentului de frecare viscoasă pe disc (M). Valorile momentului (1.18) s-au obținut din măsurarea puterii nete (fig. 1.3) furnizate de motorul de c.c.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P_s - P_g}{\omega} \quad (1.18)$$

C_M depinde de regimul de curgere prin: numărul Re, prezența sau absența carcasei prin raportul $s = B/R$ și de rugozitatea relativă k/R a discului în rotație. Rugozitatea relativă nu intervine dacă discul este neted. Pentru determinarea grosimii statului limită δ , se utilizează relația propusă de Kármán (1.20)

Din tabelele 1.1 și 1.2 se poate observa că odată cu creșterea Re , scade grosimea stratului limită și deci scade influența rugozității asupra C_M . În instalația de lucru suprafața discului este netedă.

Tabelul 1.2, Grosimea stratului limită în funcție de natura fluidului, turație și raza discului

R	n	ω	Re	δ
[m]	[rot/min]	[rad/s]	-	[mm]
AER (20 °C)				
0,1	1000	104,6	72020	0,973
0,1	1500	156,9	105300	0,787
0,2	1000	104,6	280000	0,487
APĂ (20 °C)				
0,05	1000	104,6	523000	0,356
0,1	1000	104,6	1046000	0,252
0,2	1000	104,6	2092000	0,166

Din determinările experimentale (tabele 1.3÷1.8) se observă că pentru regim laminar există o dependență uniformă între valorile experimentale ale coeficientului momentului de frecare (C_M^e) și numărul Re (C_M^e scade cu creșterea numărului Re) iar în cazul regimului turbulent valorile C_M^e au o tendință incoerentă, tendință regăsită și în literatura de specialitate [Schlichting și colab., 1999] (fig. 1.6).

Rezultatele obținute experimental sunt comparate cu cele calculate cu relații consacrate (tabele 1.9 și 1.10 și fig. 1.7) și se observă că în regimul laminar rezultatele experimentale sunt cu 31% mai mici decât cele calculate. Pentru regimul de tranziție și turbulent rezultatele experimentale diferă cu 6÷37% față de cele teoretice. Variația mare a coeficientului momentului de frecare în zona numărului Re_{cr} este semnalată și de alți autori [Schlichting și colab., 1999], însă rezultatele sunt prezentate grafic la scară logaritmică, și sunt greu de evaluat.

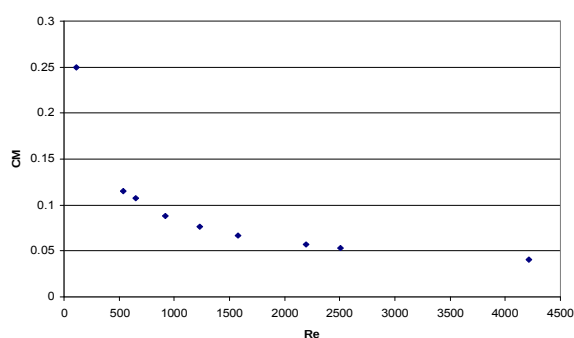


Fig. 1.5, Dependența $C_M(Re)$ pentru numere Re mici

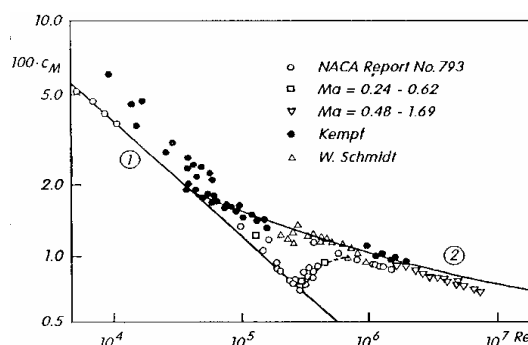


Fig. 1.6, $C_M(Re)$ în regim: 1- laminar, 2- turbulent

Cercetările efectuate extind valorile coeficientului momentului de frecare C_M pentru numere Reynolds cu valori $Re = 10^2 \div 10^3$ (fig. 1.5).

Din analiza literaturii de specialitate rezultă următoarele:

- Pentru $Re < (1 \div 3) \cdot 10^5$, C_M crește cu distanța între disc și carcasă (B/R) (fig. 2.1 și 2.2)
- Pentru $Re = ct$, $B/R = f(C_M)$ are un minim în zona $B/R_{min} = 0,01 \div 0,03$ (fig. 2.2 și 2.3) pentru discuri rugoase și în zona $B/R_{min} = 0,06$ pentru discuri netede. Variația B/R_{min} se explică prin complexitatea și dificultatea cercetărilor experimentale
- Influența rugozității asupra C_M crește odată cu scăderea numărului Re [Gulich, 2003].

Compararea soluțiilor pentru C_M obținute numeric, experimental și cu formule din literatura de specialitate sunt prezentate în tabel 2.1. În tabel 2.2 se observă că valorile C_M cresc cu de 2÷4 ori mai mult începând cu $B/R = 0,02$.

Tabel 2.2, Influența raportului B/R asupra coeficientului momentului de frecare C_M

Re	141	535	1228	2195	4212	10736
$B/R = 1$	0,3669	0,1493	0,0924	0,0707	0,05815	0,0340
$B/R = 0,5$	0,3594	0,1461	0,0885	0,0669	-	0,0317
$B/R = 0,1$	0,5445	0,151	0,0756	0,0574	0,0434	0,0290
$B/R = 0,02$	2,25	0,6	0,2575	0,1505	0,0759	0,0325

În partea a doua a etapei finale, începând cu capitolul 3, după o scurtă analiză a studiilor, privind *stabilitatea coloanei* (fig. 3.1), din literatura de specialitate, se prezintă cercetările de laborator pentru diferite tipuri și dimensiuni de generatoare de bule fine - GBF (ceramice Ø 50, 100 și 150 și din sticlă Ø 50 și 150). S-a constatat că, de la un anumit debit de aer numit *debit de stabilitate* (Q_s) coloana de bule își schimbă forma:

- pentru $Q < Q_s$, coloana are o axă fixă în spațiu și timp,
- pentru $Q > Q_s$ axa coloanei descrie o mișcare elicoidală,
- pentru $Q \gg Q_s$ se fragmentează, luând aspectul unui brad.

Q_s este strâns legat de eficiența oxigenării. Testele efectuate în laborator pe un GBF Ø 50 mm au arătat că eficiența aerării este maximă în jurul valorii de 150 l/h, după această valoare intrându-se pe un palier. Acest fapt confirmă teoria conform căreia sistemele de aerare cu GBF reduc cheltuielile cu energia, obținând o aerare maximă la valori mici ale debitului de alimentare cu aer. La funcționarea cu debite de aer mai mari, se observă un efect de gaz-lift. Pentru realizarea unui transfer de masă eficient cu costuri energetice scăzute, trebuie evitată funcționarea la astfel de debite deoarece consumul energetic este ridicat, iar bulele ies prea rapid din sistem. S-au determinat Q_s (tabel 3.1) pentru fiecare GBF studiat.

Tabelul 3.1, Debitele maxime de stabilitate pentru GBF testate

Tipul	Q_s [l/h]
GBF ceramice Ø 50	150 ÷ 170
GBF ceramice Ø 100	500 ÷ 600
GBF ceramice Ø 150	400 ÷ 500
GBF din sticlă Ø 50	130 ÷ 150
GBF din sticlă Ø 150	250 ÷ 350

Pentru o mai bună observare a evoluției coloanei de bule, în cadrul experimentărilor cu GBF Ø50 se pornește de la debite mici (30 ÷ 70 l/h), unde coloana este stabilă (fig. 3.2). Când $Q \approx 180$ l/h, se instalează regimul tranzitoriu, iar coloana de bule are din când în când anumite deviații neperiodice în direcții și la înălțimi aleatoare (fig. 3.3). De la debite ce depășesc 250 l/h, coloana capătă o mișcare puternic elicoidală (fig. 3.4). La $Q > 400$ l/h, coloana de bule se înclină, atingând alternativ pereții bazinului. Nu s-a observat o periodicitate a mișcării, dar s-a măsurat un timp minim și maxim de deplasare a coloanei de la un perete la cel opus și al unei rotații complete. Timpul de deplasare al coloanei este min 11s și max 20s; și cel de rotație este min 19s și max 31s.

La creșterea debitului se produc desprinderi ale coloanei, asemănătoare cu aspectul unui brad (fig. 3.6). Rezultate comparabile privind perioada de oscilație a coloanei au fost obținute [Bech, 2005] prin simularea rezultatelor de laborator. Datorită instabilității în spațiu și timp a coloanei, s-au efectuat mai multe determinări ale Q_s pentru același generator. Acestea s-au realizat prin filmarea repetată a coloanei de bule, la diverse debite de aer $Q = 78 \div 624$ l/h (fig. 3.9).

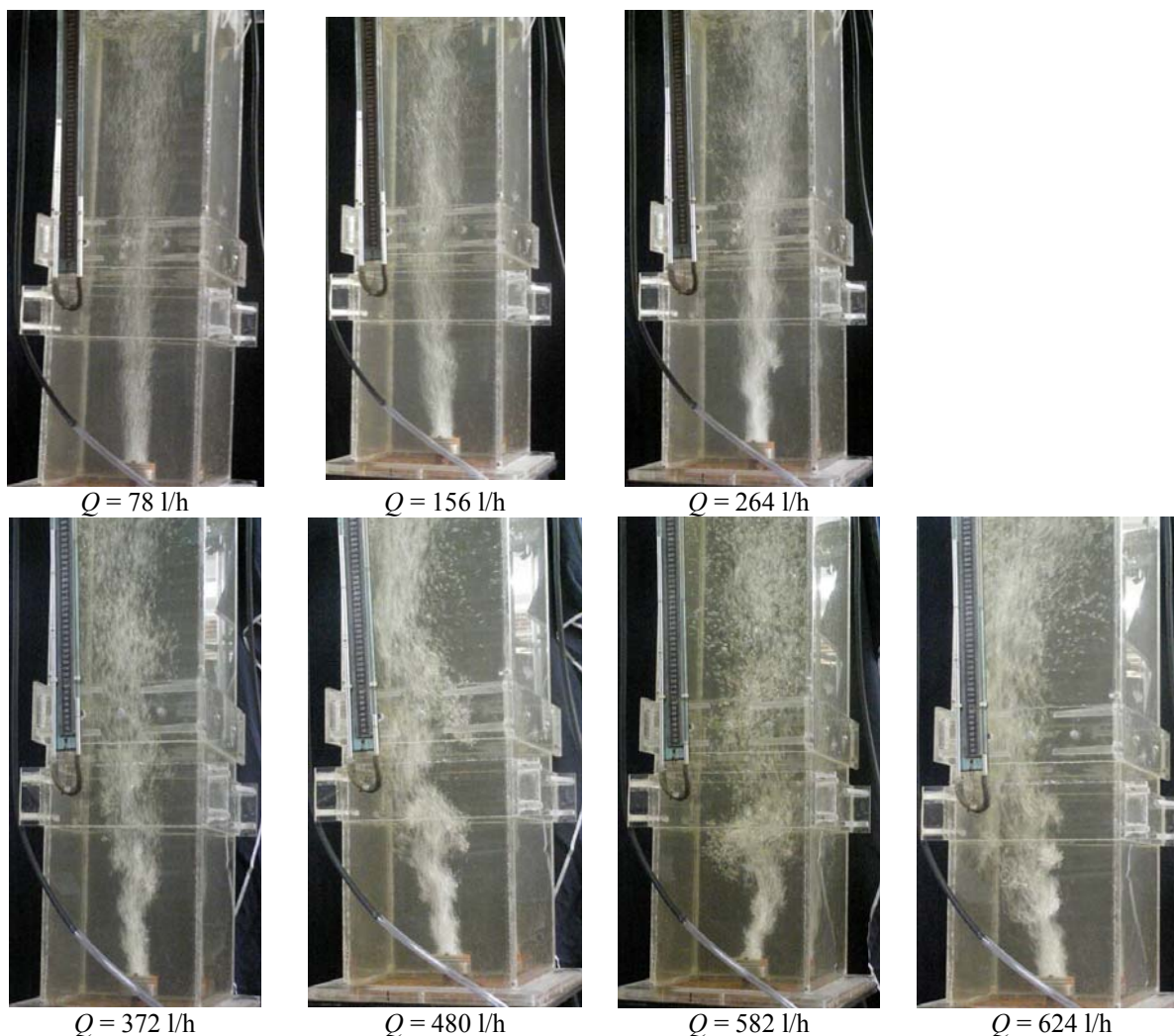


Fig. 3.9, Exemple privind evoluția coloanei de bule cu mărirea debitului de alimentare cu aer

În cataloagele firmelor producătoare sunt indicate intervale ale *debitelor specifice*, q , de funcționare în condiții optime pentru generatoare de bule, din ceramică și din membrană elastică, recomandându-se intervalul $q = 1 \div 7 \text{ l/h}\cdot\text{cm}^2$, respectiv debitele $Q = 50 \div 350 \text{ l/h}$. Raportând debitele maxime de stabilitate (vezi tabelul 3.1) la suprafața de emisie a generatoarelor testate în laborator, rezultă valorile maxime ale debitului specific de funcționare (tabel 3.2). Generatoarele testate, se încadrează în limitele recomandate de firmele producătoare.

Tabelul 3.2, Debitelor specifice de funcționare ale generatoarelor testate

Material GBF	Diametru [mm]	Suprafața [cm^2]	q [$\text{l/h}\cdot\text{cm}^2$]
ceramică	50	19,625	$7,64 \div 8,66$
	100	78,5	$6,36 \div 7,64$
	150	176,625	$2,26 \div 2,83$
sticlă	50	19,625	$6,62 \div 7,64$
	150	176,625	$1,41 \div 1,98$

S-a determinat *fracția de goluri* globală ε , pentru GBF Ø 50mm, din sticlă și ceramică. Măsurătorile s-au efectuat pe aceeași instalație experimentală cu care s-a urmărit stabilitatea coloanei la care s-a adăugat o cameră foto digitală, un compresor prevăzut cu regulator de debit și de presiune, un rotametr și o riglă gradată (pentru măsurarea înălțimii stratului de lichid expandat). Capturile fotografice s-au făcut la un interval de $5 \div 10 \text{ s}$, la funcționarea continuă a instalației în condiții hidrodinamice impuse. S-a utilizat metoda variației înălțimii stratului de lichid - una dintre cele mai utilizate metode în astfel de studii, care constă în

măsurarea înălțimii stratului de lichid inițial H_i și cel expandat, H_e . Poziția inițială a suprafeței se determină (fig. 4.2), cu camera poziționată imediat sub suprafața liberă. Un factor care influențează determinarea exactă a suprafeței libere este acumularea unui strat de bule sub nivelul acesteia. La debite medii camera se focalizează imediat sub interfață; suprafața liberă e tangentă la stratul de bule și se determină prin diferența de luminozitate în zona de degazare.

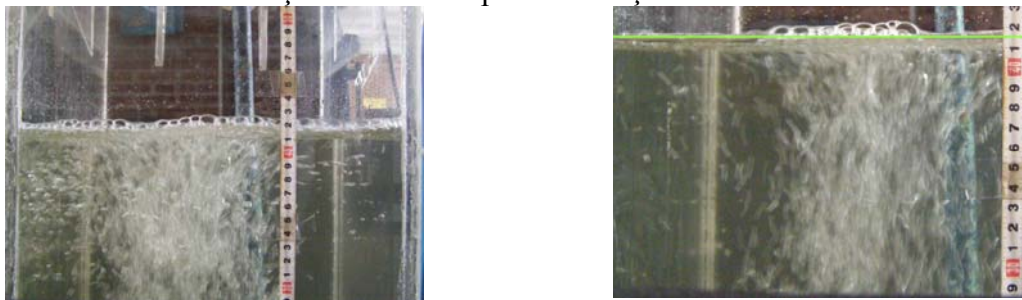


Fig. 4.2, Efectul de spumare și delimitarea suprafeței libere

Pentru ca rezultatele privind fracția de goluri globală să fie ușor comparate cu cele publicate la nivel internațional, s-a definit viteza superficială a bulelor – w (4.4). În figura 4.3 se prezintă variația fracției de goluri globale în funcție de viteza superficială pentru GBF ceramic Ø 50 mm. Se constată că fracția de goluri globală variază liniar cu viteza superficială a aerului, până la o anumită valoare, $w_{trans} \approx 0,2$ cm/s. Acest regim de funcționare se numește regim omogen.

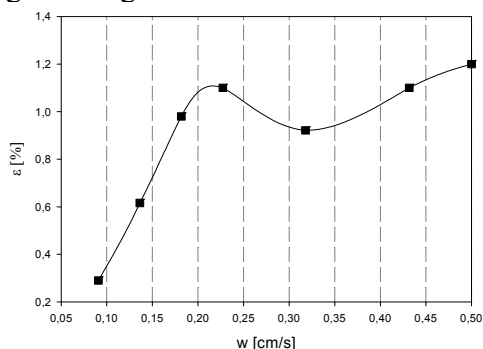


Fig. 4.3, Variația $\varepsilon = f(w)$ pentru sistemul aer-apă

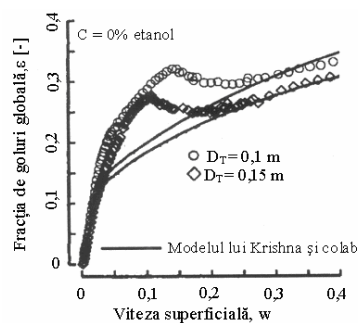


Fig. 4.6, Influența diametrului coloanei asupra fracției de goluri globale [Mouza și colab., 2005]

La $w > w_{trans}$ - regimul eterogen, bulele mici se adună în “ciorchini” și formează bule mari ducând scăderea fracției de goluri. Bulele, având viteză ascensională mai mare, părăsesc sistemul mai rapid; astfel, fracția de goluri continuă să crească, însă cu o pantă mai mică decât în regimul omogen. Se observa 3 regimuri de curgere:

- $0 < w < 0,2$ cm/s, regim omogen,
- $0,2 < w < 0,3$ cm/s, regim tranzitoriu,
- $w > 0,3$ cm/s, regim eterogen

Comparând rezultatele experimentale proprii cu cele din literatura (fig. 4.6) se observă același tip de corelație între fracția de goluri și viteza superficială, regimul tranzitoriu fiind marcat de o creștere a lui ε . Trecerea de la un regim de curgere la altul determină modificări radicale ale sistemului dispers aer-apă, care se reflectă concomitent în următorii parametri hidrodinamici: distribuția mărimii bulelor de gaz, fracția de goluri globală și locală, viteza ascensională a bulelor. În urma studiilor efectuate, se extrag următoarele concluzii:

- ε este o mărime hidrodinamică importantă, deoarece oferă informații asupra regimului de curgere și a ariei specifice interfaciale din coloana de aerare.
- Fracția de goluri nu este o mărime constantă, ci variază pe direcție radială și axială, variație care depinde de structura internă a distribuției gazului, de natura celor două

faze, de regimul de curgere, de caracteristicile geometrice ale coloanei de aerare, de tipul și dimensiunile GBF.

- Pentru măsurarea experimentală a ε nu este recunoscută încă o metodă standard. Erorile mari de măsură a acestui parametru și importanța sa în calcularea ariei specifice interfaciale și în delimitarea regimurilor de curgere justifică eforturile pentru îmbunătățirea preciziei metodelor.
- ε depinde în mod direct de 2 factori: mărimea și densitatea bulelor de aer, concretizați în structura DMBG.
- ε variază liniar cu viteza superficială a aerului, până la w_{trans} . Experimental, s-a obținut $w_{trans} \approx 0,2$ cm/s, care marchează trecerea la regimul omogen la tranzitoriu, când începe să se producă coalescența bulelor. La creșterea w , sistemul intră în regimul eterogen.
- Lucrarea dezvoltă o metodă de determinare a fracției de goluri globale. Avantajele metodei constau în faptul că nu necesită aparatură costisitoare și este o metodă neinvazivă; în schimb, timpul mare necesar prelucrării fotografiilor o face mai puțin utilizabilă. Pentru determinarea fracției de goluri există metode de măsură care oferă date experimentale mai rapid și chiar mai precis, însă acestea mai puțin accesibile datorită costului ridicat al echipamentelor iar unele sunt invazive.
- Observațiile referitoare la influența multitudinii de factori asupra fracției de goluri confirmă complexitatea fenomenului studiat.

În ultimul capitol s-a procedat la punerea în funcțiune a sistemului acustic de măsurare a vitezei – Micro ADV 16 MHz conform PV.

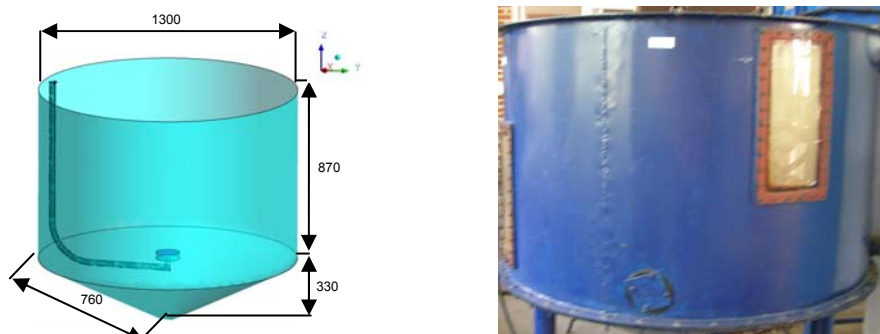


Fig. 4.7 Instalația experimentală pentru testarea sistemului acustic de măsurare a vitezei

S-au efectuat cercetări experimentale preliminare (tabelele 5.1 ÷ 5.5) privind curgerea indusă de o coloana de bule, păstrând aceeași instalație și respectând aceleași condiții de funcționare (fig. 2.2.3) ca cele din simularea numerică ($H = 850$ mm, $Q = 70 \div 600$ l/h, GBF din sticlă cu diametrul $d = 120$ mm și porozitatea $250 \div 315$ μ m).

CRITERII DE PERFORMANȚĂ ATINSE

Criteriile minime de performanță prevăzute pentru acest an au fost îndeplinite astfel:

- O cerere de brevet [Bunea și colab., 2009] a fost depusă la OSIM. Invenția se referă la o instalație de laborator pentru determinarea performanțelor hidrodinamice ale difuzorilor de bule, folosiți pentru aerarea/oxigenarea apelor.
- Un articol [Oprina și colab.] a fost trimis spre recenzie din data 2.02.09, la o revistă cotate ISI conform CNCSIS (Environmental Engineering and Management Journal), cf. Anexa.

De asemenea, în urma cercetărilor efectuate în acest proiect au mai fost publicate:

- un articol [Bunea și colab., 2009] într-o revistă indexată în baza de date internațională și
- un articol [Oprina și colab., 2009] publicat la Editura Cartea Studentească, și prezentat la o Conferința Internațională *Advanced Technologies for the Water and Wastewater Treatment and Water Reuse*.



Vizitarea Centralei Hidroelectice

În vederea efectuării activităților de informare-documentare, un cercetător a efectuat o deplasare la Site du SALTO, Italia pentru documentarea privind curgerea indusă din aspiratoarele turbinelor, dar și pentru discuții privind colaborarea într-un proiect privind aerarea apelor turbinate. În urma acestei vizite a rezultat depunerea unui proiect la competiția POSCCE-A2-O2.1.2. Propunerea de proiect a apărut ca o aplicație directă a cercetărilor privind curgerile generate de coloane de bule și are ca obiectiv principal *Stabilirea unui soluții de aerare la CHE pentru a garanta și monitoriza parametrii conținutul de OD astfel încât să se atingă parametrii necesari vieții acvatice.*

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Bech K., *Dynamic simulation of a 2D bubble column*, Chemical Eng. Science, 60, p. 5294-5304, 2005.
- Becker S., De Bie H., Sweeney J., *Dynamic flow behaviour in bubble columns*, Chemical Engineering Science 54, p. 4929-4935, 1999.
- Bunea F., Oprina G., Ciocan G.D., Băran G., Ilie C., Pincovski I., *Aeration parameters optimization for an imposed energy consumption*, Technical University of Cluj-Napoca, series: Applied Mathematics and Mechanics, Acta Technica Napocensis, Nr. 52, Vol.II, ISSN 1221-5872, p. 279-284
- Bunea F., Oprina G., Baran G., *Instalatie de laborator pentru determinarea caracteristicilor hidrodinamice ale difuzorilor de bule*, Cerere brevet nr. OSIM A/00549/16.07.2009
- Buwa V.V., Ranade V.V., *Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations*, Chemical Engineering Science 57, p. 4715-4736, 2002.
- Diffuser Express Catalogue* from Environmental Dynamics Inc., 2004.
- Florea M., *Cercetări teoretice și experimentale privind frecarea viscoasă pe un disc în rotație*, Teză de doctorat, 2009.
- Florea M., Băran Gh., Panaitescu V., *About viscous dissipation on the disks of turbomachines rotors*, U.P.B. Sci.Bull., Series D, Vol. 70, No. 2, p. 85-92, 2008.
- Gulich J.F., *Disk friction losses of closed turbomachine impellers*, Forschung im Ingenieurwesen, Springer Verlag DOI 10.1007/s10010-003-0111-x, 68, p. 87-95, 2003.
- Jamialahmadi M., Müllner-Steinhagen H., *Effect of Superficial Gas Velocity on Bubble Size, Terminal Bubble Rise Velocity and Gas Hold-up in Bubble Columns*, Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing, Vol. 1, Issue 1, p. 16 – 31, 2008.
- Mouza, A.A., Dalakoglou, G.K., Paras, S.V., *Effect of liquid properties on the performance of bubble column reactors with fine pore spargers*, Chemical Engineering Science 60, p. 1465-1475, 2005.
- Mudde R.F., Groen J.S., van den Akker H.E.A., *Liquid velocity field in a bubble column: LDA experiments*, Chemical Engineering Science 52, p. 4217-4224, 1997.
- Oprina G., Bunea F., Pincovski I., Mandrea L., *Aspects of hydrodynamics and mass transfer in diffused aeration systems*, Environmental Engineering and Management Journal, acceptat spre publicare pentru 2010 cf. Anexa
- Oprina G., Staicu D., Bunea F., Băran Gh., *Experimental researches regarding the performance of fine bubble generators*, Advanced technologies for the water and wastewater treatment and water reuse, Ed. Cartea Studentească, p. 66-71, ISBN 978-606-501-027-7, 2009
- Pincovski I., *Hidrodinamica și transferul de masă în coloane cu barbotare*, Ed. Ars Docendi, ISBN 973-8118-47-6, 2001
- Rampure M. R., Kulkarni A. A., Ranade V. V., *Hydrodynamics of Bubble Column Reactors at High Gas Velocity: Experiments and Computational Fluid Dynamics Simulations*, Ind. Eng. Chem. Res., 46 (25), pp 8431-8447, 2007.
- Ris V.F., *Țentrobje și compresorii mașini*, Izd. Mašinostroenie Tretie Izdanie, Leningrad, p. 33, 1981
- Schlichting H., Gerten K., *Boundary layer theory*, 8th Revised and Enlarged Edition, Springer, Bochum, p. 601-606, 1999.
- Simmonet M., Gentric C., Olmos E., Midoux N., *Experimental determination of the drag coefficient in a swarm of bubbles*, Chemical Engineering Science, 62, p. 858-866, 2007.
- Stava P., Zaponel J., Wagnerova, Zubik P., *Investigation of instabilities during transition from laminar to turbulent flow in the gap between two concentric discs, one rotating, by methods of nonlinear dynamics*, Strojnický casopis, 55, C. 2, p. 100-118, 2004.



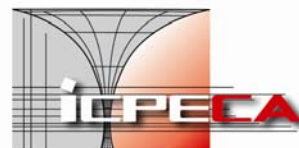
INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE - DEZVOLTARE
PENTRU INGINERIE ELECTRICĂ INC DIE ICPE-CA



Nr. Registrul Comerțului
J40/3800/2001
Cod Fiscal R 13827850
Capital Social: 381.108 Lei
Trezorerie:
RO56TREZ7035069XXX001105

Cont : ROL
RO52RNCB0076029424690001
BCR Sucursala Sector 5, București
Splaiul Unirii nr. 313, sector 3
București, 030138, România

Email: office@icpe-ca.ro
Tel: +4021.346.7231
+4021.346.8297
Fax: +4021.346.8299



Autoritate Contractantă - CNCSIS

SINTEZA LUCRĂRII

CURGERI AXIAL SIMETRICE INDUSE

**IDEI ID_25
NR. 232/2007**

ETAPA 2010

Director General

Prof. dr. fiz. Wilhelm KAPPEL

Director proiect

dr.ing. Florentina BUNEA

CUPRINSUL LUCRĂRII IN EXTENSO

1. Verificarea experimentală a rezultatelor teoretice	4
1.1 Determinarea puterii disipate prin frecare viscoasă	4
1.1.1 Introducere	4
1.1.2 Descrierea instalației experimentale și a modului de lucru	7
1.1.3 Prelucrarea rezultatelor experimentale	10
1.1.4 Concluzii privind puterea disipată prin frecare viscoasă	14
1.2 Determinarea vitezelor induse de coloane de bule fine	15
1.2.1 Determinarea vitezelor cu aparatura utilizând principiul Doppler –MicroADV	15
1.2.1.1 Descrierea instalației experimentale și a modului de lucru	16
1.2.1.2 Prelucrarea rezultatelor experimentale	20
1.2.1.3 Concluziile măsurărilor cu MicroADV	29
1.2.2 Determinarea vitezelor cu tehnica Particle Image Velocimetry (PIV) 2D bifazic	30
1.2.2.1 Descrierea instalației experimentale și a modului de lucru	31
1.2.2.2 Prelucrarea rezultatelor experimentale	35
1.2.2.3 Concluziile măsurărilor cu PIV	38
1.3 Validarea /corectarea rezultatelor teoretice	39
2 Diseminarea rezultatelor	44
2.1 Organizarea unei Mese Rotunde cu tema <i>Curgeri axial simetrice induse</i>	44
2.2 Comunicarea și publicarea rezultatelor obținute	47
3 Concluzii generale	48
4 Criterii de performanță atinse	50
5 Bibliografie	52
Anexe	55
Anexa 1. Extragere din valorile măsurate /calculate pentru adâncimea de $H = 650$ mm, la trei debite diferite de aer	56
Anexa 2. Program de generare a valorilor medii a componentelor vitezei, după eliminarea valorilor cu eroare mare	80
Anexa 3 - Materiale pentru promovarea / pregătirea Mesei Rotunde	81
Anexa 4 – Lista participanților la Masa Rotunda cu tema <i>Curgeri axial simetrice induse</i>	

1. VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A REZULTATELOR TEORETICE

1.1 Determinarea puterii disipate prin frecare vâscoasă

În etapa trei a proiectului a fost descrisă pe larg instalația experimentală pentru măsurarea coeficienților momentului de frecare C_M . Aceasta este alcătuită dintr-un disc subțire și neted, montat într-o carcasă cilindrică cu înălțimea $2B$. Raportul B/R poate fi micșorat, prin micșorarea înălțimii B , de exemplu prin fixarea unor plăci circulare pe capacele carcasei. La instalația de lucru (dotată cu voltmetru, ampermetru și sursa stabilizatoare de curent continuu), au fost adăugate aparate de măsură și control performante: traductor de turații, traductor de temperatură, o sursă stabilizatoare de curent și un sistem de afișare și stocare a mărimilor măsurate.



Rezultatele teoretice se referă fie la regimul laminar, fie la regimul turbulent. În cazul regimului laminar rezultatele sunt analitice sau numerice.

Soluțiile analitice sunt obținute prin integrarea ecuațiilor Navier-Stokes pentru disc liber în ipoteza fluidului incompresibil și a mișcării permanente cu simetrie axială. Metoda utilizată este metoda separării variabilelor și rezultatele sunt prezentate în etapa 2 a proiectului, finalizate în

relația

$$C_M = \frac{4,7}{\sqrt{Re}}. \quad (1)$$

Soluțiile numerice s-au obținut în aceleași ipoteze ca și în cazul soluțiilor analitice, cu relația

$$C_M = \frac{3,87}{\sqrt{Re}}. \quad (2)$$

Tabelul 1.1, Valorile coeficienților: C_M^t determinate teoretic, C_M^F determinate în programul FLUENT și valorile determinate experimental C_M^e

Re	109	535	650	915	1228	1581	2195	2509	4212	10736	14148	20470	24271	28154
C_M^t	0,3696	0,1672	0,1516	0,1279	0,1104	0,0973	0,0826	0,0772	0,0596	0,0373	0,0325	0,0270	0,0248	0,0236
C_M^F	0,4521	0,1486	0,1320	0,1086	0,0928	0,0816	0,0696	0,0654	0,0517	0,0338	0,0299	0,0256	0,0238	—
C_M^e	0,2500	0,1150	0,1073	0,0882	0,0761	0,0671	0,0569	0,0532	0,0411	0,0287	0,0204	0,0186	0,0171	0,0159
$\frac{C_M^t}{C_M^e}$	1,4784	1,4539	1,4129	1,4501	1,4507	1,4501	1,4517	1,4511	1,4501	1,2997	1,5931	1,4516	1,4503	1,4843
$\frac{C_M^F}{C_M^e}$	1,8084	1,2922	1,2302	1,2313	1,2194	1,2161	1,2232	1,2293	1,2579	1,1777	1,4657	1,3763	1,3918	—

Concluzii privind puterea disipată prin frecare viscoasă

- 1) Coeficientul de moment C_M se determină fie prin integrarea ecuațiilor curgerii, fie experimental, fie cu formule semiempirice pentru fiecare tip de turbomașină.
- 2) Determinarea cât mai precisă a valorilor C_M este importantă deoarece afectează randamentul mașinii cu $1 \div 2\%$, mai ales la cele moderne, cu turații mari; Valorile obținute în literatura de specialitate la același număr Reynolds diferă ca ordin de mărime;
- 3) Soluțiile teoretice publicate sunt cu 45% mai mari decât cele determinate în laborator; acest fapt se explică prin ipotezele simplificatoare adoptate și anume că mișcarea indusă este cu simetrie axială.

- 4) Pentru eliminarea acestei ipoteze s-a recurs la o metodă de integrare numerică a ecuațiilor Navier-Stokes, utilizând programul FLUENT pentru curgere tridimensională. Rezultatele obținute în domeniul $Re = 5 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^4$, specific turbomașinilor uzuale (numerele Re fiind obținute fie prin turații de până la 3000 rpm, fie utilizând fluide cu viscozitate de 10-12 ori mai mare decât a apei), sunt cu circa 20% mai mari ca cele determinate în laborator.

1.2 Determinarea vitezelor induse de coloane de bule fine

Pentru curgerea indusă de o coloana de bule unui fluid aflat în repaus, s-au utilizat mai multe metode: modelarea numerică cu ajutorul CFD (etapa 3), determinări experimentale folosind două tehnici diferite și compararea rezultatelor obținute cu cele regăsite în literatura de specialitate.

1.2.1 Măsurători cu Micro ADV

Pentru determinarea experimentală a vitezelor induse apei de coloana de bule s-a utilizat MicroADV (Acoustic Doppler Velocimeter), pretabil pentru aplicații de laborator. Viteza apei este măsurată folosind principiul /efectul Doppler. Acest aparat colectează în timp real componentele 3D ale vitezelor într-un volum de măsură ($\approx 0,3 \text{ cm}^3$) situat la distanța de 5 cm față de transmițătorul acustic și le transmite on line la PC (fig 2).

Parametrii indicați de MicroADV:

- Viteza (cm/s) – componentele vitezei (v_x , v_y și v_z) sunt colectate cu ajutorul receptorilor acustici poziționați pe cele 3 brate ale tijei care este introdusă în apă.
- Semnalul (dB) – (Signal-to-Noise Ratio) $SNR < 5-10\text{dB}$ duce la creșterea zgomotului în datele prelevate. Ține cont de cantitatea de material de înșămânțare împăștiat în apă.
- Corelarea (%) – indică corectitudinea vitezelor măsurate și depinde de nivelul de turbulență și de numărul de bule ce trec prin punctul de proba în timpul înregistrării. Astfel în cazul curgerii laminare, monofazice, corelarea $> 90\%$, iar în cazul curgerii puternic turbulente, bifazice și valori scăzute ale SNR , corelarea va scădea. Se urmărește o corelare $> 70\%$. În manualul de utilizare se precizează și situații în care corelarea $< 30-40\%$ oferă bune rezultate însă cu un nivel mare de zgomot; dar se poate folosi doar viteza medie, pentru a obține spectrul curgerii (Chen Ying, 2004).

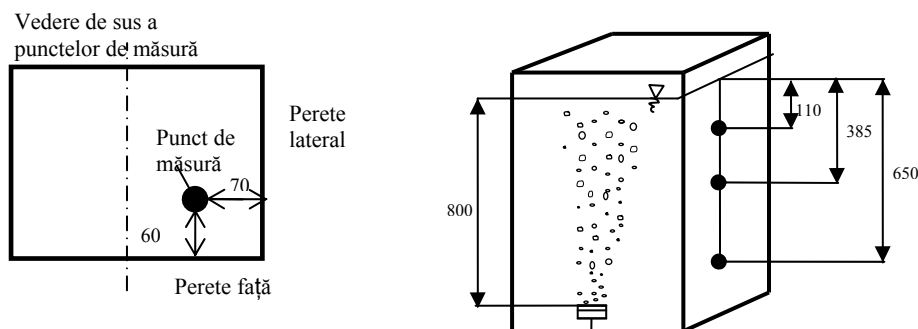


Fig.1, Dispunerea punctelor de măsură a vitezelor induse

S-au prelevat probe la 5 debite de aer $Q=3, 6, 8, 10, 12 \text{ l/min}$ și la 3 adâncimi (fig. 1).

Toate cele 3 puncte de măsură sunt situate la 70 mm de peretele lateral și 60 mm față de peretele din față. S-a fixat tija în apă și s-au prelevat cu o frecvență de 2 Hz, aprox. 400 probe pentru fiecare debit de la adâncimile 650 și 385 mm, cu o frecvență de 50 Hz, aprox. 2000 probe, de la adâncimea 110 mm.

În apropierea suprafeței libere, datorită evazării coloanei, trec un număr mai mare de bule prin volumul de prelevare, scăzând astfel procentul de corelare.

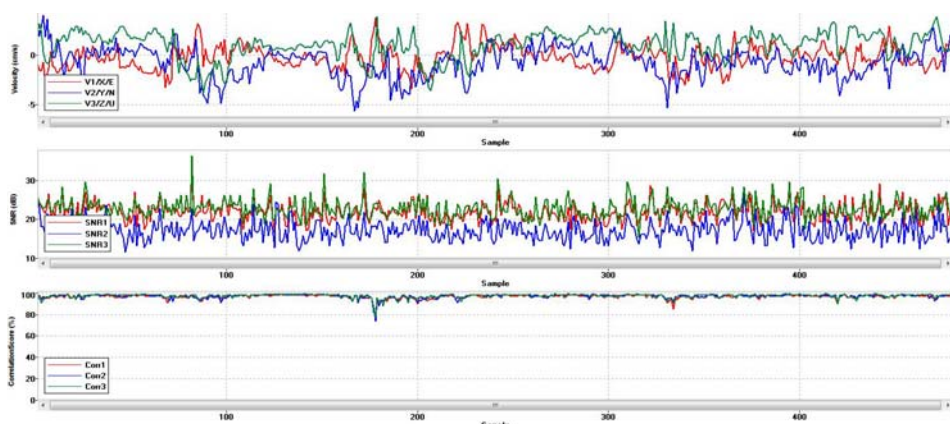


Fig. 2, Transmiterea on-line a datelor la $Q = 3$ l/min, $h = 650$ mm

După înregistrarea și salvarea datelor, acestea sunt exportate în programele de prelucrare. S-a calculat rezultanta vitezei și s-a reprezentat grafic pentru fiecare punct de măsură; un exemplu este prezentat în figura 3.

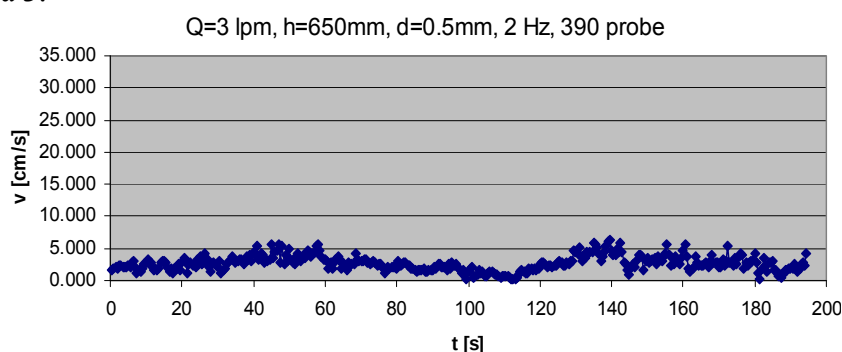


Fig. 3, Variația rezultantei vitezei în funcție de timp

S-au selectat doar probele în care toate cele 3 componente ale vitezei au o corelare mai bună de 70%. Astfel s-a construit în Matlab un program de generare a valorilor medii ale componentelor vitezei, după eliminarea valorilor cu eroare mare. Au rezultat 15 vectori de viteză (Tabel 2), corespunzători pentru cele 5 debite studiate, la cele trei adâncimi.

Tabel 2, Viteza medie, corectată, în punctele de măsură

h (mm)	Q (l/min)	f (Hz)	V_x (cm/s)	V_y (cm/s)	V_z (cm/s)	V (cm/s)	Nr. probe înregistrate	Nr. probe prelucrate	ε %
650	3	2	-0.483	-0.754	0.972	1.322	389	389	100
650	6	2	-1.083	-0.467	1.544	1.943	413	413	100
650	8	2	-0.535	0.642	1.294	1.540	383	365	95.3
650	10	2	-1.466	-0.502	1.376	2.072	583	509	87.3
650	12	2	-1.273	-0.445	0.762	1.550	348	269	77.3
385	3	2	-0.651	-0.113	1.342	1.495	419	405	96.6
385	6	2	-0.738	0.774	0.764	1.31	444	385	86.7
385	8	2	-1.543	0.005	0.7084	1.698	552	318	57.6
385	10	2	-1.058	0.597	1.167	1.685	381	152	39.9
385	12	50	-3.54	0.54	-0.713	3.653	2771	2094	75.6
110	3	50	-3.232	1.499	-1.469	3.854	7768	6641	85.5
110	6	50	-3.584	2.455	-1.215	4.511	10520	4302	40.9
110	8	50	-4.433	2.397	-5.172	7.221	1718	755	43.9
110	10	50	-3.312	2.927	-3.557	5.675	3060	931	30.4
110	12	50	-3.62	2.329	-0.669	4.357	3930	850	21.5

ε (%) - Probe cu o corelare mai mare de 70 %

Așa cum se observă din tabelul 2, sensul general a componentei V_x este spre centrul coloanei, sensul V_z este pozitiv până în apropierea suprafeței libere, unde devine negativ datorită circulației din bazin, iar sensul V_y este pozitiv în partea superioară și negativ în adâncime. Cu cât urcăm spre suprafața liberă și cu cât crește debitul, cu atât crește și numărul de probe cu o corelare mai mică de 70%.

Pentru a observa evoluția vectorilor viteze în punctele de măsură, s-au reprezentat în AutoCAD (fig. 4), valorile rezultantei vitezei în plan vertical.

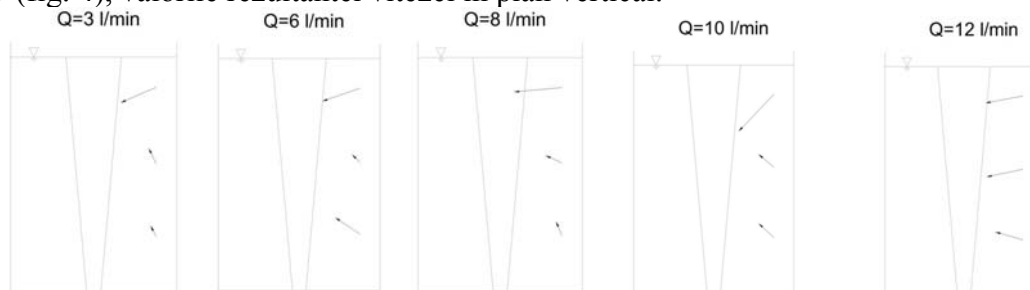


Fig. 4, Evoluția rezultantei vitezei în planul XOZ

Concluziile măsurătorilor cu Micro ADV

- Din analiza datelor rezultă ca rezultanta vitezei scade odată cu adâncimea de imersie și crește odată cu creșterea debitului de aer.
- Datorită unui grad de turbulență în curgerea indusă se poate deduce existența unor vârtejuri, ce cresc în intensitate odată cu apropierea de suprafața liberă.
- În punctele de măsură, componenta V_x este orientată în proporție de peste 80% spre coloană, tendință accentuată de creșterea debitului. Se poate presupune că aceasta se datorează vitezei ascensionale a coloanei de bule și a influenței peretelui.
- La măsurătorile cu MicroADV s-a observat o scădere a corelației de măsurare a vitezelor, atunci când prin volumul de probă trec bule de aer, scădere ce se accentuează odată cu creșterea numărului de bule.
- Este dificil de surprins evoluția curgerii induse folosind aparatura Micro ADV, deoarece acesta măsoară viteza punctuală, punctele de măsură trebuie situate la mai mult de 5cm de orice perete, iar măsurătorile în puncte diferite nu se pot face simultan, pentru a observa evoluția în timp a unui eventual vârtej surprins. Se poate determina, ca ordin de mărime, atât rezultanta vitezei într-un punct cât și componentele acesteia dar și o evoluție generală a curgerii.
- Pentru a valida calculele numerice și în perspectiva introducerii unor modele de transfer de masă în simulările numerice a fost necesară folosirea unei metode de măsură de tip PIV pentru a crea o bază de date de referință în domeniu

1.2.2. Măsurători cu Particle Image Velocimetry (PIV) 2D bifazic

În vederea validării /comparării rezultatelor obținute s-a efectuat deplasarea la Universitățile Laval, Département de Génie Mécanique. Împreună cu colectivul laboratorului s-au efectuat măsurători experimentale de analiză a curgerii 2D bifazic, folosind PIV în curgerea indusă apei de o coloană de bule. Aceasta tehnica de măsură este una din cele mai moderne, necesitând aparatură specializată și competențe specifice. Laboratorul de la Universitatea Laval este printre puținele laboratoare pe plan mondial competente în domeniu iar aceasta colaborare este o posibilitate unică de a realiza acest tip de măsurători.

Pentru dezvoltarea /completarea cercetărilor deja efectuate de colectivul prezentului contract de cercetare, s-a utilizat o *instalație cu aceleași caracteristici dimensionale* și s-au montat aceleași sisteme de generare a bulelor de gaz. Astfel, s-au efectuat măsurători pentru două difuzoare de bule, cu orificii de 0.2 și 0.5 mm.

Pentru a obține distribuția vitezelor pe întreaga înălțime a coloanei de apă, planul de măsură este calculat astfel încât să fie necesare trei seturi de măsurători (în 3 plane spațiale diferite) Astfel,

planul de măsură este definit de dimensiunea unei plăci, numite *țintă de calibrare*, de dimensiuni cunoscute. În fiecare plan astfel definit, s-au efectuat măsurători la patru debite de aer: $Q = 3, 6, 8$ și 12 l/min, pentru fiecare debit de aer prelevându-se 2000 de probe. Primul pas îl reprezintă montarea țintei (fig. 6) pentru calibrarea planului de măsură.



Fig. 5, Reglarea primului plan de măsură: camera foto, plan laser, ținta de calibrare

Imaginile astfel obținute se transmit la PC și se prelucreză pentru a crea o grila /reper pentru imaginile ce urmează a se preleva în timpul măsurătorilor.

După reglarea coordonatelor planului de măsură, se verifică sincronizarea cu planul laser și se poziționează panoul cu leduri ce emit într-o gama de frecvențe diferite cu rolul de a repera particulele în mișcare și a le diferenția în funcție de cele 3 lungimi de undă (fig. 7) respectiv în funcție de nuanța de gri a fiecăruia. Frecvența de prelevare a probelor este 1 Hz. Fiecare probă constă în înregistrarea 2D a rezultantei vectorilor viteză din planul selectat și celor două imagini foto alb-negru.

La sfârșitul măsurătorilor au rezultat 4800 de probe (2 difuzori $\times$ 4 debite $\times$ 2000 probe $\times$ 3 poziții spațiale (plane de măsură) = 4800 probe ≈ 13.3 ore măsurători efective), echivalentul a 350 GB memorie. De precizat este că între fiecare poziție spațială, sistemul se recalibreză.

Se setează parametrii de control on line ai înregistrării, descriși mai sus și se pornește înregistrarea primelor 1000 probe, schimbându-se ulterior cei 3 timpi de expunere. Se repeta pentru cele 4 debite de aer. Imaginile obținute (fig. 6) și valorile înregistrate se salvează în vederea prelucrării ulterioare.

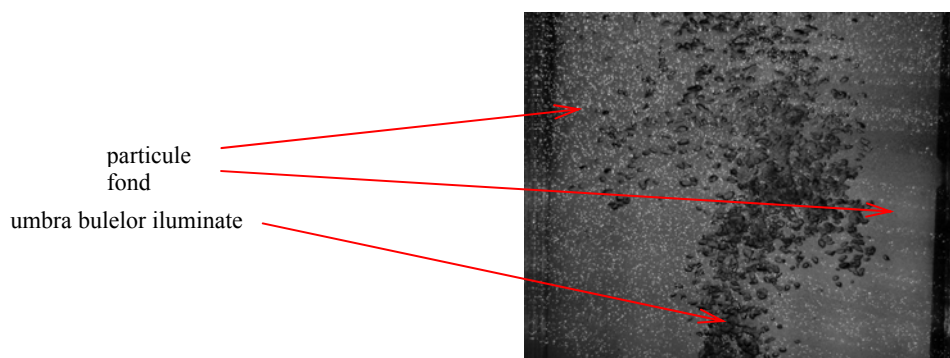


Fig. 6, Prelucrarea inițială a unei imagini înregistrate

Pentru vizualizarea vectorilor viteză indusă și a mișcării bulelor de aer se considera doar jumătatea din stânga a planului – din direcția laserului, deoarece acesta nu poate trece neperturbat de coloana de bule (fig. 8), respectiv de faza gazoasă a sistemului.

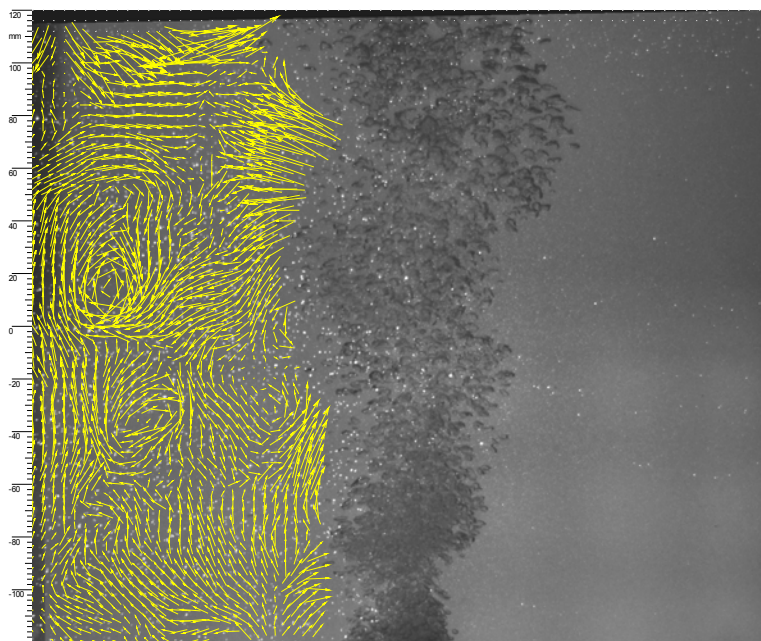


Fig. 8, Trasarea vectorilor viteze obținuti din două imagini consecutive

După o primă analiză a câmpului de viteze obținut se poate remarca existența a trei mici vârtejuri în primul plan de măsură. Tendința generală a curgerii este asemănătoare cu cea obținută prin simulare numerică. Această distribuție de viteze este imposibil de surprins cu folosind o altă tehnologie de măsură. Astfel se vor putea realiza simulări numerice ce vor fi validate cu aceste rezultate.

1.3. Validarea /corectarea rezultatelor teoretice

În etapa 3 a proiectului s-a obținut prin simulare numerică CFD, spectrul vectorilor de viteze induse apei de către o coloană de bule. S-a observat că în planul YOZ (fig 9), de la un anumit debit (numit debit de stabilitate) curgerea nu mai este axial simetrică atât datorită oscilației coloanei de bule cât și a modificării formei acesteia. Viteza maximă $V_{max} = 0,322$ m/s s-a obținut în centrul coloanei de bule și este aproximativ egală cu viteza ascensională a bulelor determinată experimental ($0,15 \div 0,40$ m/s) pentru bule cu diametrul de $1 \div 3$ mm, și debite de aer cuprinse între 1-20 l/min.

Antrenarea apei din bazin și recircularea acesteia, au fost obținute și în alte studii (Lo, 1991). Schița mișcării apei din bazin, așa cum se observă și din figura 10 prezintă, o mișcare de circulație, iar la o anumită adâncime (ce poate varia de la un moment la altul) viteza indusă ajunge la zero, după care își schimbă sensul.

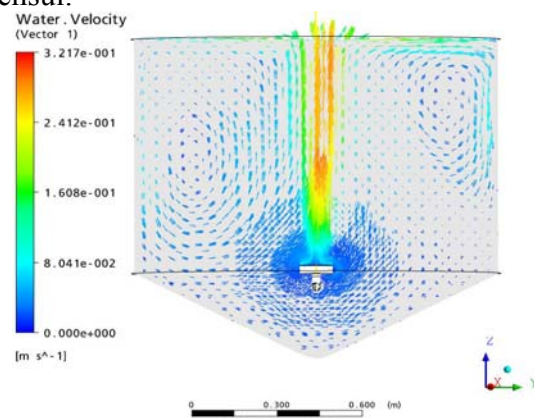


Fig. 9, Vitezele induse ale apei în domeniul analizat cu CFD

În scopul determinării numerice a valorilor vitezei în jurul punctului în care viteza apei își schimbă sensul, s-a trasat o linie verticală în planul yOz creat în domeniu (fig. 10) și s-au importat

valorile vitezei absolute și a vitezelor v_x , v_y și v_z în 25 de puncte consecutive situate pe linia verticală considerată.

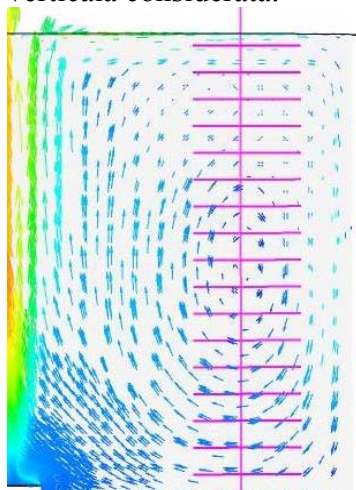


Fig. 11, Trasarea în plan vertical a liniei pentru determinarea vitezelor

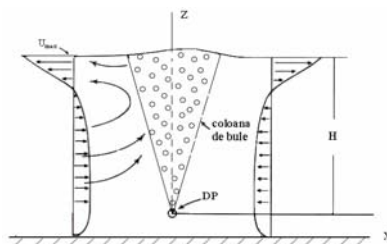


Fig. 10, Schema curgerii induse de coloană (Lo, 1991)

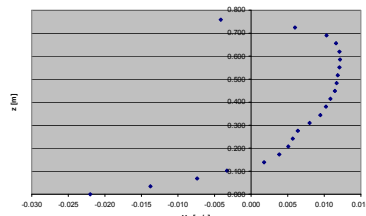


Fig. 12, Variația vitezei v_y pe verticală

Din compararea figurilor 10 și 12 se poate observa schimbarea direcției componentei orizontale a vitezei cu specificarea ca punctul de trecere prin 0 poate varia funcție de mai mulți factori: debit de aer, geometria bazinului, tipul aeratorului etc.

Cu specificarea ca axa OX din cazul măsurătorilor ADV reprezintă axa OY din simularea numerică și invers, în figura 1.3.3 sunt prezentate planele de extragere a vitezelor.

În continuare se prezintă variația componentelor și a rezultantei vitezei în cazul prezentat.

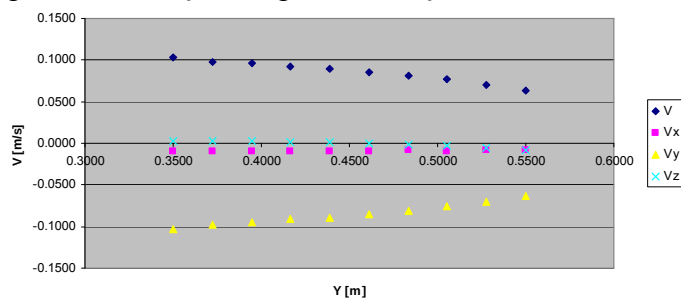


Fig. 113, Variația componentelor vitezei la adâncimea 200mm față de suprafață liberă, rezultată din simulare numerică

S-a caracterizat dinamica curgerii unei coloane de bule și prin metoda PIV în mediu difazic și s-a obținut câmpul de viteze pentru întreaga înălțime a coloanei la aceleași debite de funcționare ca și în măsurătorile efectuate cu Micro ADV și în determinările din simulările numerice.

Tabel 3, Compararea rezultatelor teoretice obținute prin simulare numerică cu cele obținute experimental la $Q = 6$ l/min

Experimental Micro ADV					Simulare numerică				
h (mm)	V_x (cm/s)	V_y (cm/s)	V_z (cm/s)	V (cm/s)	h (mm)	V_x (cm/s)	V_y (cm/s)	V_z (cm/s)	V (cm/s)
650	-1	-0.4	1.5	2	650	0,9	-0.2	-4	4
385	-0.7	0.7	0.7	1.3	400	-1	-1,5	-2	2,8
110	-3.6	2.4	-1.2	4.5	200	-6	0,6	-1	6

Perspective:

- Finalizarea tratării datelor PIV și obținerea unei baze de date de referință pentru acest tip de curgere (4 debite)
- Realizarea unei convenții de colaborare cu Université Laval pentru dezvoltarea unui model de simulare numerică cu considerarea transferului de masă și aplicarea acestuia la cazuri particulare.

2. DISEMINAREA REZULTATELOR

2.1 Organizarea unei mese rotunde cu tema *Curgeri Axial-Simetrice Induse*

În data de 13 septembrie 2010 a fost organizată o Masă Rotundă în scopul prezentării principalelor rezultate obținute în perioada de desfășurare a prezentului proiect de cercetare. La această manifestare (Anexa 3), au fost invitați toți cei interesați în probleme de curgeri induse, cu simetrie axială. Discuțiile s-au axat pe cercetările experimentale privind, căderea de presiune pe dispozitivele de aerare testate, stabilitatea coloanei de bule, măsurătorile vitezelor induse apei de o coloana de bule în diferitele ei regimuri de funcționare. Soluționarea numerică a ecuațiilor de mișcare a fost analizată atât din punctul de vedere al metodelor folosite în primul an de derulare (metoda dezvoltărilor în serii Taylor finite) cât și al metodelor moderne de integrare și soluționare folosite în partea a doua a proiectului (Computational Fluid Dynamics).

Au participat 23 de persoane (Anexa 4 – Lista participanților) de la diferite institute de profil: INCDIE ICPE-CA, ISPH SA, UPB – Facultățile de Energetică și Inginerie Mecanică, UTCB – Facultățile de Hidrotehnică și Instalații, Universitatea Petrol și Gaze Ploiești, SYSCOM 18 SRL, INCDT COMOTI, Hidroelectica SH Târgul Jiu, Admin. Naț. Apele Române – revista Hidrotehnica.



Fig. 2.1, Prezentarea rezultate obținute în contractul de cercetare



Fig. 2.3, Discuții asupra problemelor prezentate

3. CONCLUZII GENERALE

Cercetările privind curgerile induse cu simetrie axială, corespunzătoare celor două probleme propuse, s-au finalizat astfel:

1. În cazul mișcării induse de un disc în rotație, într-o carcasă cilindrică, caz cu aplicație la rotoarele turbomașinilor, a mașinilor cu discuri ș.a. rezultatele teoretice publicate sunt parțial confirmate de cele experimentale; de regulă în domeniul $Re = 500 \div 10^4$ sunt cu 45% mai mari în ceea ce privește puterea consumată prin frecare viscoasă, față de cele măsurate în laborator. Acest fapt se datorează ipotezei simplificatoare precum că mișcarea indusă poate fi modelată matematic de ecuațiile de mișcare scrise pentru cazul axial simetric.

Programele de calcul numeric de tip FLUENT necesită etape de calcul validate experimental, astfel încât în final s-au obținut valori ale puterii consumate prin frecare viscoasă cu 20% mai mari decât cele măsurate, fapt ce reprezintă un progres în măsurătorile efectuate. S-a obținut o bază de rezultate experimentale, într-un domeniu larg de numere Re , domeniu care extinde datele publicate.

2. Din analiza datelor experimentale a vitezelor în cazul curgerii induse de o coloană de bule efectuate cu Micro ADV, rezultă ca rezultanta vitezei scade odată cu adâncimea de imersie și crește odată cu creșterea debitului de aer. Totodată datorită unui grad de turbulență în curgerea indusă se poate deduce existența unor vârtejuri, ce cresc în intensitate odată cu apropierea de suprafața liberă. S-a observat o scădere a corelației de măsurare a vitezelor, atunci când prin volumul de probă trec bule de aer, scădere ce se accentuează odată cu creșterea numărului de bule.

Este dificil de surprins evoluția curgerii induse folosind Micro ADV, deoarece acesta măsoară viteza punctuală și nu pot descrie curgerea instantanee nestaționară. Se poate determina, ca ordin de mărime, atât rezultanta vitezei într-un punct cât și componentele acesteia dar și o evoluție generală a curgerii.

Pentru a valida calculele numerice și în perspectiva introducerii unor modele de transfer de masa în simulările numerice, a fost necesară folosirea unei metode de măsură de tip PIV pentru a crea o baza de date de referință în domeniu. Astfel s-a inițiat o colaborare cu Université Laval – Laboratoire de Machines Hydrauliques (Prof. G.D. Ciocan și Prof. C. Deschênes) pentru efectuarea măsurătorilor curgerii 2D bifazic, folosind tehnica PIV. Această tehnică de măsură este una din cele mai moderne, necesitând aparatură specializată și competențe specifice. Această colaborare este o posibilitate unică de a realiza acest tip de măsurători.

Pentru curgerea indusă de o coloana de bule unui fluid aflat în repaus, s-au utilizat mai multe metode: modelarea numerică CFD, determinări experimentale folosind două tehnici diferite și compararea rezultatelor obținute cu cele care s-au regăsit în literatura de specialitate.

4. CRITERII DE PERFORMANȚĂ ATINSE

Criteriile minime de performanță prevăzute pentru acest an au fost îndeplinite astfel:

1. Un articol la o conferință internațională de prestigiu

Bunea F., Sebastian Houde, Ciocan G.D., Oprina G., Pincovchi I., *Aspects concerning the quality of aeration for environmental friendly turbines*, 25th IAHR2010 Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, published by the Institute of Physics (IoP), Conference Series: Earth and Environment Science, Vol. 12, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, (2010) 012035

2. A fost trimisă spre evaluare:

Baran G., Oprina G., Bunea F., *The variation of small orifices discharge with viscosity and superficial tension*, Chemical, Engineering Sciences, Categorie ISI Rosu

3. Acceptat spre publicare:

Mandrea L., Babutanu C.A., Baran G., Oprina G., Bunea F., *Draft tube length influence on the flow inside reactors with intubated impeller*, Revista de Chimie, acceptata spre publicare

4. Au mai fost publicate:

Oprina G., Bunea F., Panaitescu V., Băran G., Băbuțanu C. *The Efficiency of Aeration through Perforated Plates*, A X-a Conf. Naț.multidisciplinară cu participare internațională “Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș 2010, 4-5 iunie, pp. 403-410, vol. 18/2010, Ed. AGIR, ISSN 2067-7138

Oprina G., Băran Gh., Bunea F., Nemțoiu S., *Determinarea nivelului de oxigen dizolvat în avalul centralelor hidroenergetice*, Sesiunea științifică jubiliară Hidrologia și gospodărirea apelor – Provocări 2025 pentru dezvoltarea durabilă a resurselor de apă, București 28-30 septembrie, poster

5. Articolul acceptat spre publicare în etapa 3 (2009) a fost publicat

Oprina G., Bunea F., Pincovschi I., Mândrea L., 2010, *Aspects of hydrodynamics and mass transfer in diffused aeration systems*, Environmental Engineering and Management Journal (ISI), vol. 9, nr. 4, ISSN 1582-9596, p. 565-572

În perioada de desfășurare a proiectului au fost propuși și realizați indicatorii de performanță prezentați în tabel 4.

Tabel 4, Indicatori de performanță propuși și realizați

An	Nr articole acceptate spre publicare în reviste indexate ISI	Nr articole acceptate spre publicare în reviste indexate în baza de date internaționale	Nr cereri de brevete naționale depuse	Nr. art. publicate la conferințe

	propus	realizat	propus	realizat	propus	realizat	propus	realizat
2007	0	1	1	1	0	0	0	0
2008	1	0	1	4	0	0	0	0
2009	1	1	0	1	1	1	0	1
2010	1 cf act ad IV	1- acceptat spre publicare 1- in curs de evaluare	1	1	0	0	0	2
TOTAL	3	4	3	7	1	1	0	3

Colaborarea inițiată cu colectivul de la Université Laval – Laboratoire de Machines Hydrauliques pentru efectuarea măsurătorilor curgerii 2D bifazic, folosind tehnica PIV se va finaliza cu publicarea rezultatelor într-o revistă cotate ISI.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Becker, S., Sokolichin, A. and Eigenberger, G., (1994), Gas-liquid flow in bubble columns and loop reactors: Part II. Comparison of detailed experiments and flow simulations. *Chem. Eng. Sci.*, 49, 5747-5762.
- Bunea F., Houde S., Ciocan G.D., Oprina G., Pincovchi I., (2010), *Aspects concerning the quality of aeration for environmental friendly turbines*, 25th IAHR2010 Symp. on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science **12** (2010) 012035
- Bunea F., Oprina G., Baran G., (2009), *Instalatie de laborator pentru determinarea caracteristicilor hidrodinamice ale difuzorilor de bule*, patent application no. OSIM A/00549/2009
- Ciocan G.D., Iliescu, M.S., Vu, T.C., (2007), Nennemann, B., Avellan, F., *Experimental Study and Numerical Simulation of the FLINDT Draft Tube Rotating Vortex*, Journal of Fluid Engineering, Vol. 129, pp. 147 – 158
- Duquesne P., Iliescu M., Fraser R., Deschênes C., Ciocan G.D., (2010), *Monitoring of velocity and pressure fields within an axial turbine*, 25 IAHR Symposium proceedings, The 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems
- Gülich J.F., *Disk friction losses of closed turbomachine impellers*, Forschung im Ingenieurwesen, Springer Verlag DOI 10.1007/s10010-003-0111-x, 68, p. 87-95, 2003.
- Iliescu M., (2007), *Analysis of large scale hydrodynamic phenomena in turbine draft tubes*, Teza de doctorat no. 3775, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Kurakada I., Iamada T., Matsumoto K., Performances of centrifugal impeller of very low specific speed, Proc 19-th Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation, v. II, Singapore, 1998.
- Sathe M., Thaker I., Strand T., Joshi Jyesh J., (2009) *Advanced PIV/LIF and shadowgraphy system to visualize flow structure in two-phase bubbly flows*, Chemical Engineering Science, 65 (2010) 2431–2442
- Tomasicchio G. R., (2006), *Capabilities and limits for ADV measurements of breaking waves and bores*, Coastal Engineering 53, pp. 27 – 37.
- Zhang D., (2007), *Eulerian modeling of reactive gas-liquid flow in a bubble column*, PhD thesis, Faculty of Science and Technology, University of Twente, Netherlands, ISBN 978-90-365-2560-2
- Ying C., Davidson M.J., Wang H.W., Law A.W.K., (2004), *Radial velocities in axisymmetric jets and plumes*, Journal of Hydraulic Research, vol. 42, nr. 1, pp. 29-33.
- YSI Environmental Company, SonTek *ADVField - Acoustic Doppler Velocimeter, Technical Documentation*, SUA, 2001.