

A FEM MODEL FOR FILTERING SYSTEMS

Petrica A. Negoias and Alexandru M. Morega

Department of Electrical Engineering, POLITEHNICA University of Bucharest
andrei@iem.pub.ro, amm@iem.pub.ro

Abstract

Baghouse has been known as the most efficient dust-removing device used so far, and its application is constantly increasing. Accordingly, the interest in the filter market in the air pollution reduction field is remarkable. The economical efficiency and reliability of the filter has recently improved further and baghouse gradually replaces existing devices such as ESPs (electrostatic precipitators) or scrubbers and is also widely used in various processes including material recycling and harmful material removal.

As dust accumulates the high-pressure drop resulting from the filter, the fan power increase – the performance greatly varies according to the types and characteristics of dust. On the other hand, the flowrate cannot increase very much and there are also the problems of dust re-entrainment that may damage the filter. Therefore, filter cleaning should be regularly conducted, which contributes to decreasing the dust collection efficiency.

Recently, hybrid-type particle removing technology that integrates two or more dust collection mechanisms is under development – for instance, the filtration technology that is equipped with multiple functions for simultaneous treatment of heavy metals and harmful gases as well as dust.

This work is concerned with the optimal design of a baghouse fabric filter system. The goal is an optimal filtering system that reduces the inflow dust load into the filter and improves the efficiency and life of the filter. To approach is, we use a structural, constructal design that enhances the collection efficiency of dust particles by reshaping the filtration parts and. The mathematical model of the filter is solved numerically, by the FEM technique, as implemented by FEMLAB.

Keywords: *filtering system, optimal design, forced flow, channel flow, finite element*

INTRODUCERE

Domeniul de filtrării aerului industrial a suferit schimbări semnificative în ultimii douăzeci de ani. Necesitatea utilizării sistemelor de filtrare crește pe măsura ce capacitățile de producție (poluanți) se dezvoltă. Creșterea capacităților de filtrare pentru o aceeași sau mai mică “amprentă” a filtrului (secțiune de filtrare), reglementările din ce în ce mai stricte referitor la particulele fine de praf (de ex. EPA M₁₀ și PM_{2.5}), precum și utilizarea pe scară din ce în ce mai mare a colectoarelor de praf în controlul poluării sunt câteva dintre factorii importanți care au determinat această evoluție.

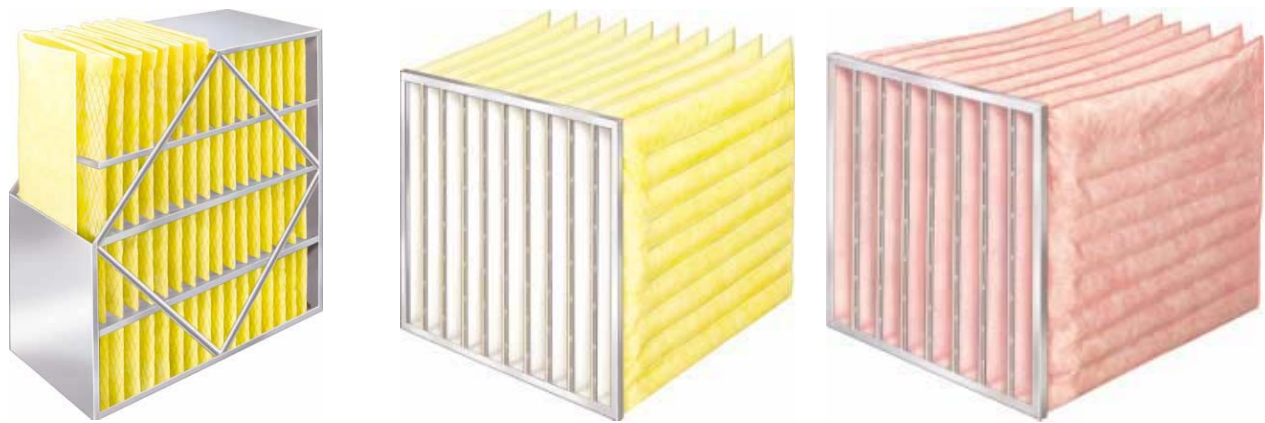
Scopul oricărui echipament modern de filtrare este asigurarea unui nivel minim de emisii. El poate fi atins cu ajutorul unor medii de filtrare cu proprietăți superioare și cu un design optim al sistemului de filtrare. Sistemele de filtrare de tip “punga” (Fig. 1) sunt optime pentru aplicațiile care necesită procesarea unui volum redus sau mediu de gaz. În consecință, optimizarea lor structurală (materiale, structură, curgere, biocompatibilitate, fonocompatibilitate, etc.) constituie un obiectiv de proiectare important.

Sistemele de filtrare de tip “punga” sunt cele mai eficiente dispozitive de retenție a prafului utilizate în prezent, iar aplicarea lor este în continuă creștere. Eficiența economică și fiabilitatea filtrelor a crescut, iar filtrele de tip pungă au înlocuit dispozitivele clasice (de ex. precipitatoarele

electrostatice), ele fiind utilizate in diferite procese industriale inclusiv reciclarea materialelor si indepartarea materialelor toxice. In consecinta, dezvoltarea acestor tipuri de filtre este de mare interes pentru piata echipamentelor de reducere a poluarii.

Pe masura ca praful se acumuleaza in elementul filtrant, caderea de presiune si, in consecinta, puterea consumata de ventilator cresc. Pe de alta parte, debitul filtrat nu poate creste mult. Recent, au fost promovate sisteme hibride de filtrare care folosesc doua sau mai multe principii de filtrare (de ex. mecanic si electrostatic).

In aceasta lucrare prezentam o etapa importanta in optimizarea unui sistem de filtrare de tip "punga": modelarea curgerii in elementul filtrant. Rezultatele sunt direct utilizabile in proiectarea optima a filtrului.



Vari-Pack KA-447-E, cu mediu de filtrare dublu strat, microfin

Clean-Pack

Venti-Pack UL Class 2

Fig.1 Exemple de filtre (AirGuard, Clarcor USA)

MODEL FIZICO-MATEMATIC AL CUREGERII IN CANALUL DE TEST

Modelul curgerii in canalul de test (Fig. 2) reprezinta perioada geometrica elementului filtrant care tine seama de simetriile structurale ale sistemului prezentat in Fig.1.

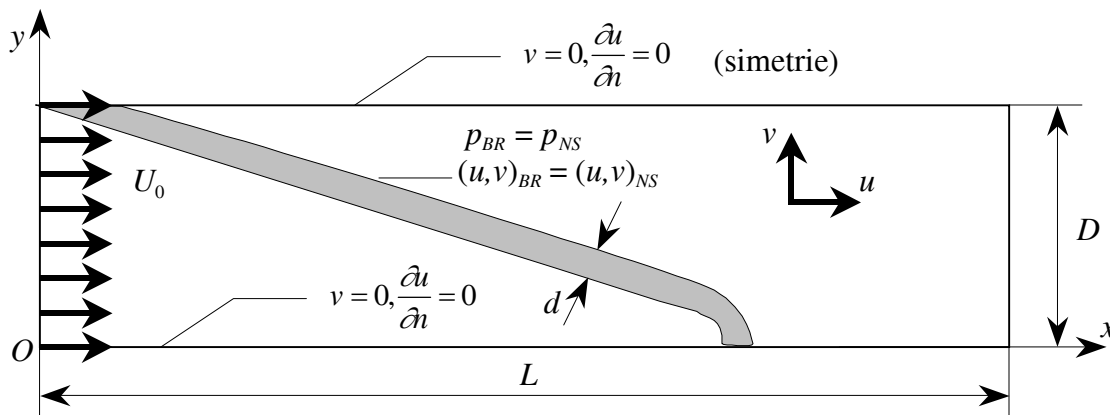


Fig.2 Model bidimensional al curgerii in canalul de test pentru element filtrant pliat, tip "punga"

Mediul filtrant este asimilat unui mediu poros. Proprietatile sale macroscopice (porozitate, permeabilitate) sunt date experimentale. Ecuatiile care caracterizeaza curgerea stationara,

incompresibila, vascoasa, newtoniana, a aerului sunt:

Ecuatia de conservare a impulsului

In fluidul clar (Navier-Stokes)

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u}. \quad (1)$$

In mediul filtrant: *modelul Darcy (2) sau Brinkmann (3)*

$$\frac{\eta}{k} \mathbf{u} + \nabla p = 0, \quad (2)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\eta}{k} \mathbf{u}. \quad (3)$$

Ecuatia de continuitate (conservare a masei)

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (4)$$

Pentru transportul colectiei de suspensie prin mediul filtrant este folosit modelul difuziv-convectiv de transport

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla)c = D \nabla^2 c, \quad (5)$$

respectiv in afara mediului filtrant,

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla)c = D \nabla^2 c. \quad (6)$$

Aici, \mathbf{u} este viteza aerului, p este presiunea, ρ este densitatea masica a fluidului (aer), D este difuzivitatea masica a speciei (praf) in aer, η este vascozitatea dinamica, $\nu = \eta/\rho$ este vascozitatea cinematica, c este campul de suspensii, ϕ este porozitatea, k este permeabilitatea mediului poros, iar \mathbf{F} este un termen sursa – in aplicatia noastra \mathbf{F} este nul.

Figura 2 prezinta si conditiile la limita care completeaza modelul matematic. Aici p_{NS}, p_{BR} respectiv $(u, v)_{NS}, (u, v)_{BR}$ sunt presiunea respectiv componentele vitezei la interfata fluid – mediu poros in cele doua domenii (NS – fluid, BR – mediul poros).

Formele scalate ale ecuatiilor stationare ale modelului prezentat sunt

Curgerea libera – *transportul de impuls*

$$(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\tilde{\mathbf{u}} = -\nabla \tilde{p} + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}}. \quad (7)$$

Mediul filtrant – *modele Darcy si Brinkmann pentru mediu poros*

$$-\frac{D_h^2}{k} \frac{1}{\text{Re}} \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \tilde{p} = 0, \quad (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\tilde{\mathbf{u}} - \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}} + \frac{D_h^2}{k} \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \tilde{p} = 0. \quad (8)$$

Curgerea libera si mediul filtrant – *conservarea masei, curgere incompresibila*

$$\nabla \tilde{\mathbf{u}} = 0. \quad (9)$$

Curgerea libera – *transportul de substanta*

$$(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\tilde{c} = \frac{1}{\text{Pe}} \nabla^2 \tilde{c}. \quad (10)$$

Mediul filtrant – *transportul de substanta*

$$(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\tilde{c} = \frac{D_k}{\phi \sqrt{k}} \frac{1}{\text{Pe}} \nabla^2 \tilde{c}. \quad (11)$$

In aceste ecuatii D_h este diametrul hidraulic al canalului, U_0 si C_0 sunt marimi de referinta pentru viteza si concentratie. Grupurile adimensionale Reynolds si Peclet din aceste ecuatii sunt

$$\text{Re} = \frac{U_0 D_h}{\nu}, \text{Pe} = \frac{U_0 D_h}{D} \quad (12)$$

Au fost utilizate urmatoarele definitii (scalari)

$$(\tilde{u}, \tilde{v}) = \frac{(u, v)}{U_0}, (\tilde{x}, \tilde{y}) = \frac{(x, y)}{D_h}, \tilde{c} = \frac{c}{C_0}, \tilde{p} = \frac{p}{\rho U_0^2} \quad (13)$$

MODELUL NUMERIC AL CURGERII IN CANALUL DE TEST

Modelul matematic este rezolvat numeric. Metoda elementului finit (FEM) Galerkin este utilizate pentru simularea modelelor de omogenizare Darcy (gradientul de presiune este singura sursa de miscare) si Brinkmann (transportul de moment datorita frecarii vascoase este important) formulate anterior (in etapa precedenta), in asociere cu legea de conservare a masei pentru curgerea in canalul de test, referitoare la mediul filtrant, si respectiv Navier-Stokes pentru mediul fluid (clar). Prima etapa de tratare numerica se refera la constructia rețelei de discretizare.

Reteaua de element finit

In acest studiu am testat cateva tipuri de rețele de discretizare FEM. Figura 3 prezinta o retea de tip “pavat”, nestructurata – se poate observa structura aproape uniforma in regiunile cu fluid clar, respectiv in stratul poros, si combinatia dintre elemente pavaj si triunghiulare in regiunile interfetelor fluid – poros.

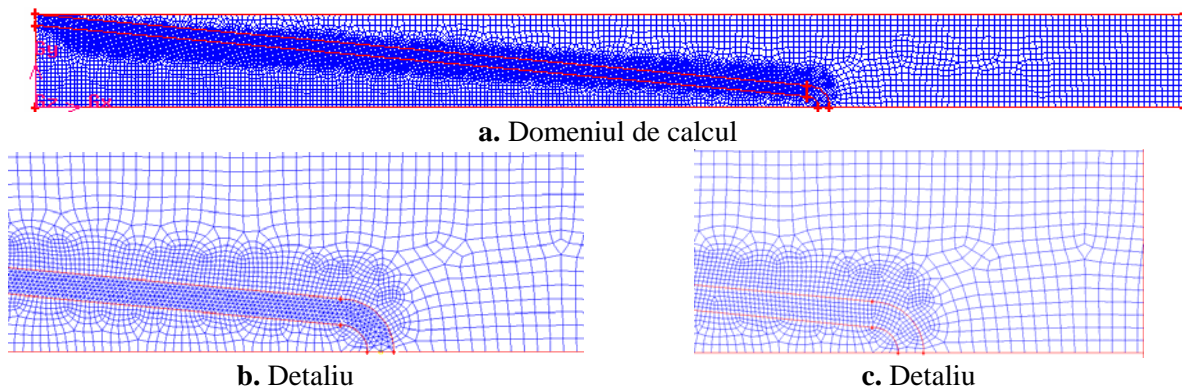


Fig.3 Retea FEM “pavata”

Figura 4 prezinta reteaua nestructurata, triunghiulara pe care am utilizat-o in modelarea numerica. Rezultatele de simulare prezentate in continuare au fost obtinute pentru o retea cu 11702 elemente interioare, 867 elemente de frontiera, 56223 grade de libertate. Am selectat elemente de tip P_2-P_1 – Lagrange de ordinul 2 pentru campul de viteze si $O(1)$ pentru campul de presiune.

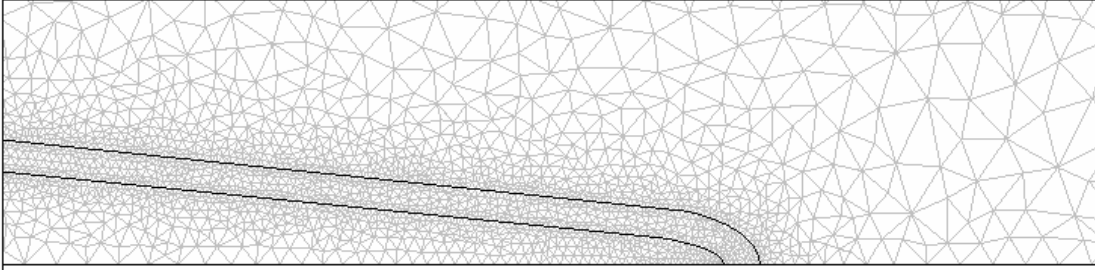


Fig.4 Detaliu al domeniului de calcul – se observa mediul poros care modeleaza elementul filtrant

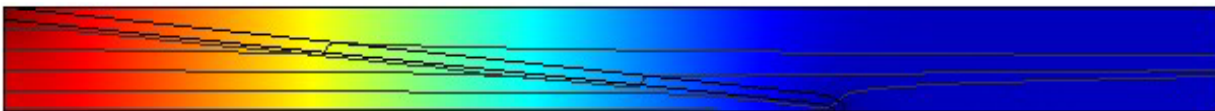
REZULTATE SI DISCUTII

Modelul de omogenizare Brinkmann pentru medii poroase (contine un termen care tine seama de vascozitate, suplimentar termenului specific Darcy) este recomandat in imprejurarile in care regiunile de fluid (clar) alterneaza cu regiuni cu mediu poros. Specificarea conditiilor de interfata intre cele doua tipuri de regiuni (fluid clar si mediu poros) se reduce la precizarea continuitatii campului de presiune si al campului de viteza: presiunea este impusa pe interfata fluid – mediu poros pentru rezolvarea curgerii in regiunea cu fluid clar, respectiv campul de viteze este dat la interfata fluid – mediu poros pentru rezolvarea curgerii in mediul poros.

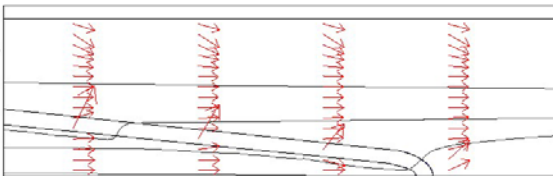
Conditiiile la limita au fost stabilite astfel (Fig.2):

- peretii orizontali sunt linii de curgere (simetrie): componenta normala a vitezei este zero, derivata dupa normala a componenteii orizontale este zero (curgere cu alunecare)
- profilul de viteza la intrare este uniform, U_0
- iesirea din canal este libera, fara efort (neutra)

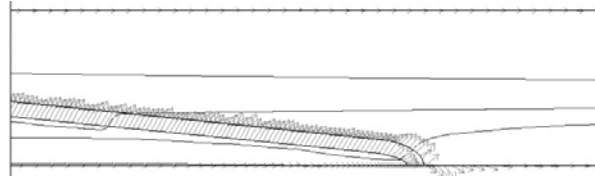
In acest studiu am utilizat pachetul FEM FEMLAB (Comsol, AB) [8] pentru modelarea curgerii aerului ($\rho_{aer} = 1,165\text{kg/m}^3$, $\eta_{aer} = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(s.m)}$, $\nu_{aer} = 0,160\text{cm}^2/\text{s}$ [6,7]), intr-un canal cu $L = 0,5\text{m}$, $H = W = 0,1\text{m}$, care reprezinta o “perioada” geometrica a sistemului de filtrare cu element de tip “punga”. Am utilizat solverul direct UMFPACK, cu o toleranta relativa 10^{-6} , fara reactualizarea iacobianului (Good-Broyden) – pentru viteze de intrare pana la 1m/sec , si GMRES, cu preconditionare prin factorizare LU incompleta si o toleranta de 10^{-5} pentru viteze mai mari. Figura 5 arata rezultatele pentru $U_0 = 1\text{m/s}$, respectiv $Re = 2500$ – limita laminara.



a. Campul de presiune si linii de curent



b. Viteze (domeniu) si linii de curent – detaliu

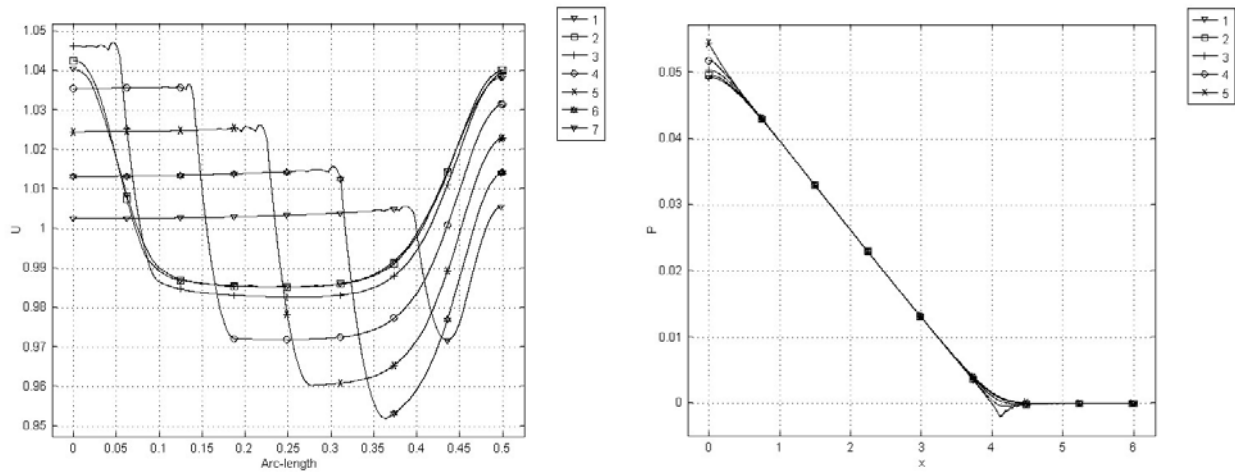


c. Viteze (interfete) si linii de curent – detaliu

Fig.5 Rezultate numerice pentru $U_0 = 1\text{m/s}$

Permeabilitatea mediului poros (filtrant), k , a fost stabilita la $3,14 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Pentru debitele specificate vitezele de $1,81\text{m/s}$ sunt in limitele regimului de curgere laminar, respectiv $3,38\text{m/s}$ in limitele regimului turbulent.

Figura 6 prezinta profilurile de viteza si presiune in diferite sectiuni din canalul de test.



a. Viteza orizontala in 5 sectiuni transversale

b. Presiunea axiala la 5 cote echidistante

Fig.5 Profile de viteza si presiune pentru $U_0 = 1\text{ m/s}$

In continuare prezentam rezultatele obtinute pentru canalul cu obstacole (de ex. insertii metalice cilindrice), care au rolul de a deflecta curentul. Aceste elemente joaca rolul de trubulatori, si produc o dispersie semnificativa a curentului la viteze de intrare mai mici. Figura 6 arata o structura cu trei obstacole.

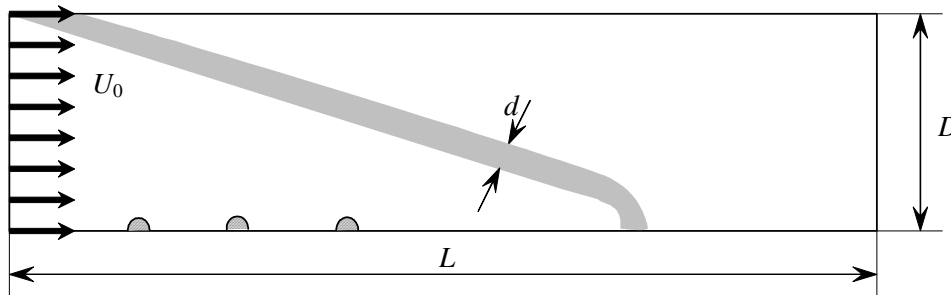
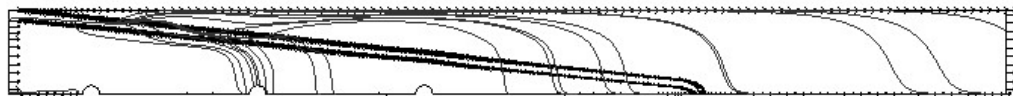
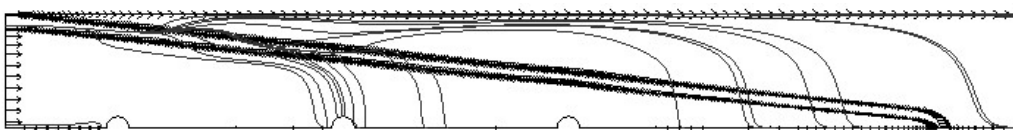


Fig.6 Model bidimensional al canalului de test cu trei obstacole

Rezultatele numerice pentru acest caz sunt grupate in Fig.7.



a. Curgerea in canalul cu obstacole



b. Curgerea in canalul cu obstacole – detaliu

Fig.7 Viteze (interfete) si linii de curent la $U_0 = 0.1\text{ m/s}$

ATEE-2004 CONCLUZII

In aceasta studiu am urmarit modelarea curgerii intr-un canal reprezentativ pentru un sistem de filtrare mecanica. Au fost analizate o serie de modele de omogenizare Darcy (gradientul de presiune este singura sursa de miscare) si Brinkmann (transportul de moment datorita frecarii vascoase este important) formulate anterior (in etapa precedenta) in asociere cu legea de conservare a masei pentru curgerea in canalul de test, referitoare la mediul filtrant, si respectiv Navier-Stokes pentru mediul fluid (clar). Principalele rezultate:

- Modelele considerate apartin clasei tehnicilor de reziduuri ponderate in formularea Galerkin. Baza de reprezentare proiectiva a solutiei (viteze, presiune) si geometriei este spatiul polinoamelor Legendre – liniare si patraticice.
- Conditia la limita pe care am adoptat-o pentru modelarea curgerii la iesirea din canal presupune efort normal nul (componenta normala a tensorului deviatoric este zero), respectiv curgere libera, neconstransa extern.
- Modelul de curgere bifazica (solid-gaz) de nivel doi, in care una dintre faze (solida) este dispersata in mediul fluid corespunde cazului in care mediul dispersat (alcatuit din particule) este solid. In acest studiu am considerat cazul in care faza dispersata (particule solide) poseda caracteristici care o disting de faza transportoare (gaz), dar nu influenteaza faza transportoare. Acest cuplaj univoc (de la faza transportoare la faza transportata) permite rezolvarea secventiala a problemei: intai curgerea fazei transportoare, apoi antrenarea fazei transportate. Faza transportoare este modelata utilizand formularea Euler pentru faza transportoare si formularea Lagrange pentru faza transportata.
- Modelele numerice de tip element finit Galerkin pentru curgerile de tip Darcy si Brinkmann pentru curgerea in canal, in care elementul filtrant este asimilat unui mediu poros, furnizeaza rezultate numerice cu acuratete satisfactoare pentru parametrii de curgere si proprietatile de mediu considerate.
- Modelarea numerica in cazurile canalelor cu geometrii simple (rectangulare, circulare) este realizata cu acuratete satisfactoare.
- Modelarea numerica in cazurile canalelor cu geometrii complexe (de ex. canale cu elemente deflectoare, obstacole) este realizata cu acuratete satisfactoare pe retele hibride (de ex. structurat-pavat) si triunghiulare, datorita flexibilitatii pe care acestea o poseda in tratarea geometriilor complexe.

Mentiune – Studiu a fost realizat cu suport partial din partea grantului RELANSIN 1750/01.08.2003.

Bibliografie

- [1] Leith, D., and Ellenbecker, M.J., “Theory for pressure drop in a pulse-jet cleaned fabric filter”, *Atmos. Environ.*, **14**, 845, 1980.
- [2] Koehler, J.,L., and Leith, D., “Pressure drop in a pulse-jet cleaned fabric filter: Theory and calibration”, *Atmos. Environ.*, **17**, 1909, 1983.
- [3] Hinds, W.C., *Aerosol Technology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [4] Ahmadi, G., “Particle transport, deposition and removal”, ME 437537, Dept. of Mech. And Aeron. Eng., Clarkson Univ., Potsdam, NY, USA, 2003
- [5] Davis, A.M.J., Barry, S.I., and Ethier, C.R., “Stokes flow in a channel with a porous outlet: application to dead-end filtration”, Dept. of Mathematics., Univ. College, UNSW, Canberra, ACT, 2601, Australia, 2003.
- [6] Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, Wiley, New York, 1984.
- [7] Bejan, A., *Heat transfer*, Wiley, New York, 1993.
- [8] FEMALB v.3.0a, Comsol AB, Sweden, 2004
- [9] Morega, A.I.M., *Modelare numerica pentru probleme la limita in inginerie*, MatrixRom, Bucuresti, 1998.