

Comportarea ferrofluidelor în câmpuri magnetice de joasă intensitate

Corneliu BUZDUGA¹, Abdelkader BENABOU², Victor BEŞLIU³, Galina MARUSIC³, Constantin FILOTE¹,
Călin CIUFUDEAN¹

¹Universitatea „Ştefan cel Mare”, Suceava, ²Polytech’Lille France, ³Universitatea Tehnică a Moldovei, Chişinău
cbuzduga@eed.usv.ro, Abdelkader.Benabou@univ-lille1.fr, vbeshliu@yahoo.com, galinamarusic@yahoo.com,
filote@eed.usv.ro, calin@eed.usv.ro

Rezumat - În acest articol prezentăm comportarea ferrofluidului de tip APG E32 în prezenţa unui câmp magnetic. Experimentul s-a bazat pe introducerea unui tub cu ferrofluid într-un câmp magnetic produs de doi electromagneţi, punctul forte fiind măsurarea forţei magnetice ce se exercită asupra acestui tub. Acelaşi lucru s-a realizat şi prin modelarea 3D a modelului experimental, prin folosirea a doua programe I-deas pentru realizarea geometriei, iar Carmel care este un cod de program realizat de echipa de modelare a laboratorului L2EP din cadrul Polytech’Lille.
Cuvinte cheie - ferrofluid, forţă magnetică, inducţie magnetică, intensitate magnetică, magnetizaţie.

I. INTRODUCERE

Ferrofluidele sau lichidele magnetice, sunt dispersii coloidale de particule feromagnetice ultrafine, cu o stabilitate ridicată în timp, în diverse configuraţii de câmp şi gradienti de câmp extern. Un ferrofluid este alcătuit din trei componente: lichidul de bază (apă, petrol, etc.), particule feromagnetice (Fe₃O₄) dispersate în lichidul de bază şi un stabilizant (acid oleic) folosit pentru a preveni aglomerarea particulelor. Acest nou tip de materiale reacţionează aproape instantaneu în prezenţa unui câmp magnetic [3, 4, 5, 6, 7, 8].

II. MODEL ROSENSWEIG

Ecuatia lui Bernoulli este bine cunoscută în hidrodinamică şi electromecanică. Recent, domeniul său de aplicare a fost extins şi în ferohidrodinamică (FHD), care potrivit lui R.E. Rosensweig, se ocupă cu mecanica de mişcare a fluidelor aflate sub influenţa câmpurilor magnetice. Ecuatia lui Bernoulli FHD a fost introdusă de Rosensweig în special pentru a modela energia magnetică a unui fluid magnetizabil care curge în prezenţa unui câmp magnetic [1, 2].

Pentru a măsura câmpul magnetic folosind această metodă gravitometrică s-a folosit un tub de greutate w_t şi aria secţiunii transversale a_t , care conţine ferrofluid şi este suspendat vertical printr-un fir între doi poli magnetici folosiţi ca sursă de câmp magnetic de intensitate H_a . Forţa F este dată de suma presiunilor şi greutatea tubului şi se calculează cu formula 1.

$$F = (p_2^* - p_0)a_t + w_t \quad (1)$$

Ecuatia generalizată a lui Bernoulli este:

$$p^* + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh - \mu_0 \bar{M} H = cons \quad (2)$$

unde: ρ – densitatea fluidului
 g – acceleraţia gravitaţională
 h – înălţimea coloanei de fluid
 μ_0 – permeabilitatea vidului
 M – magnetizaţia
 H – intensitatea câmpului
 \bar{M} – magnetizaţia medie.

Rezultă relaţia pentru magnetizaţia medie:

$$\bar{M} = \frac{(F - F_0)/a_t}{\mu_0 H_2} \quad (3)$$

unde: a_t – secţiunea transversală a tubului
 F_0 – forţa în absenţa câmpului magnetic dată de relaţia (4).

$$F_0 = w_t + \rho g(h_2 - h_1)a_t \quad (4)$$

III. MODEL EXPERIMENTAL

După modelul propus de R.E. Rosensweig am experimentat în laboratorul L2EP din cadrul Politech’Lille, măsurarea forţei magnetice ce acţionează asupra unui tub cu ferrofluid. Pentru acest experiment s-au folosit un dispozitiv pentru generarea câmpului magnetic de tip Electroaimant EA80F cu întrefier variabil 0-30 mm alimentat de la o sursă de tip Albs JFA Electronique 3010, 30V/10A, o punte tensometrică ce are suspendat un tub cu ferrofluid între cei doi poli magnetici şi este conectată la un AC / DC Clamp Meter, 400V AC / DC, 30A AC / DC pentru măsurarea

forţei magnetice, un Gauss-Teslameter FH-55 pentru măsurarea inducţiei magnetice B şi intensităţii câmpului magnetic H. Schema de principiu a experimentului precum şi o fotografie sunt prezentate în figurile 1, respectiv 2.

Între electromagneţii (1) şi (1') care produc câmpul magnetic de inducţie B şi intensitate H_a , este suspendat un tub din material plastic transparent de lungime 80 mm şi diametru interior 18 mm. Tubul conţine o coloană de ferrofluid (2), de tip APG E32 cu înălţimea de 50 mm şi este etanşat cu un capac (5). Suspendarea tubului se face cu ajutorul unui fir (4), de senzorul de forţă sau puntea tensometrică (3) ce are posibilitatea de măsurare de până la 5 N. Înainte de a aplica câmpul magnetic asupra tubului, se măsoară forţa în absenţa câmpului magnetic F_0 cu ajutorul dispozitivului de măsurare Clamp-Meter 400V/30A AC / DC la care $1V \approx 1N$ [9].

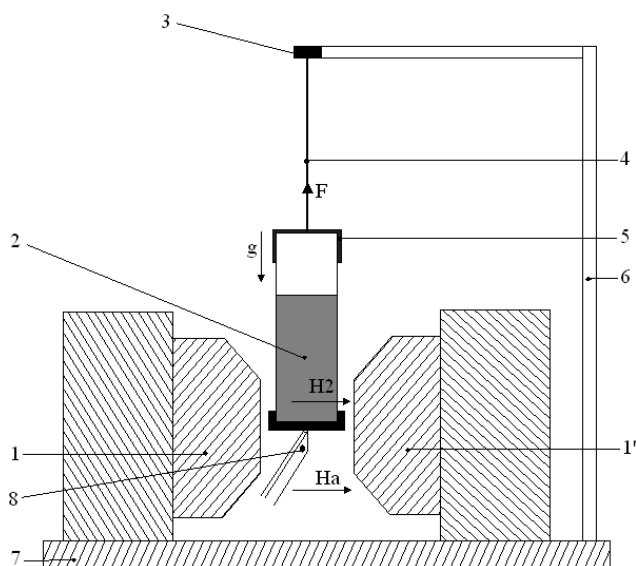


Fig. 1. Schema de principiu a experimentului. 1, 1' – poli electromagnetici, 2-ferrofluid, 3 – punte tensometrică, 4 – fir, 5 – capac, 6 – suport, 7 – masă, 8 – senzor pentru măsurarea inducţiei și intensităţii câmpului magnetic

Forţa magnetică exercitată asupra tubului cu ferrofluid a fost calculată cu formula $F_m = F - F_0$. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în Tabelul I.

TABELUL I. REZULTATE OBȚINUTE EXPERIMENTAL

U[V]	I[A]	B[T]	H_2 [MA/m]	F[N]	F_m [N]
1	0,5	0,037	0,030	2,2	0,1
3	1,3	0,100	0,080	2,5	0,4
5	2	0,161	0,129	2,8	0,7
7	2,8	0,228	0,181	3,1	1
9	3,7	0,293	0,232	3,4	1,3
11	4,5	0,357	0,285	3,7	1,6
13	5,3	0,420	0,335	4	1,9

Pentru a reuși să trasăm grafic rezultatele obținute am avut nevoie de mai multe valori ale forței și câmpului

magnetic, aceasta a fost posibil prin varierea sursei de alimentare. Forța în absența câmpului magnetic pentru această problemă este $F_0 = 2,1N$ iar forța maximă totală este $F = 4N$.

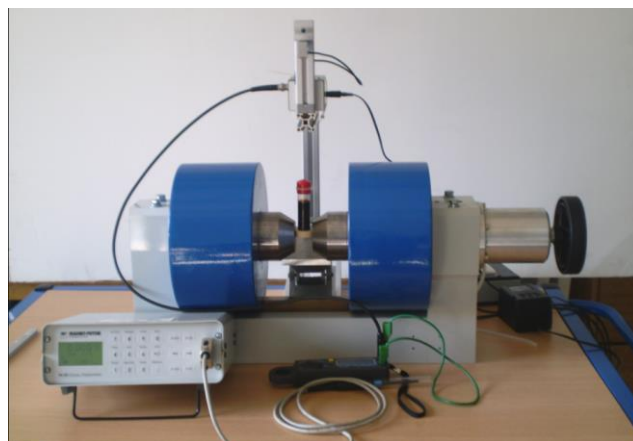


Fig. 2. Vedere de ansamblu a standului experimental

Trasarea grafică a caracteristicii inducţiei magnetice în funcţie de intensitatea magnetică B(H) este reprezentată în figura 3.

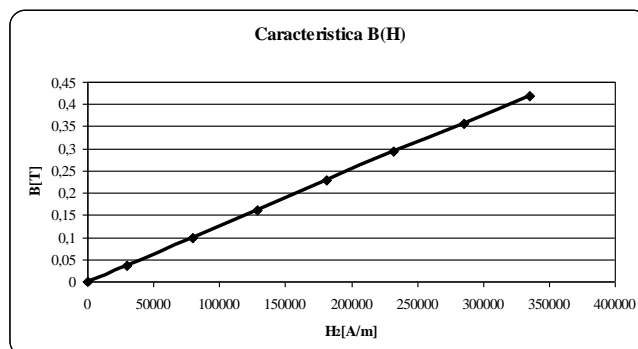


Fig. 3. Caracteristica B(H) pentru modelul experimental

Calculând cu ajutorul relațiilor (3), (5) și (6), obținem M, inducția magnetică B_f în ferrofluid și permeabilitatea relativă μ_r .

$$B_f = \mu_0 (H + M) \quad (5)$$

$$B_f = \mu_0 \mu_r H_2 \Rightarrow \mu_r = \frac{B_f}{\mu_0 H_2} \quad (6)$$

unde: permeabilitatea absolută este $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ și B_f – inducția magnetică în ferrofluid.

În urma calculului am obținut rezultatele prezentate în Tabelul II.

Curba de magnetizare M(H) trasată experimental este prezentată în figura 4, iar evoluția forței magnetice în

funcție de inducția magnetică $F_m(B)$ este reprezentată în figura 5.

TABELUL II. REZULTATE OBTINUTE DUPĂ CALCUL

$M[A/m]$	$B_f[T]$	μ_r
10429,277	0,051	1,348
15643,915	0,120	1,196
16977,893	0,183	1,132
17286,094	0,249	1,096
17531,974	0,313	1,076
17565,098	0,380	1,062
17745,337	0,443	1,053

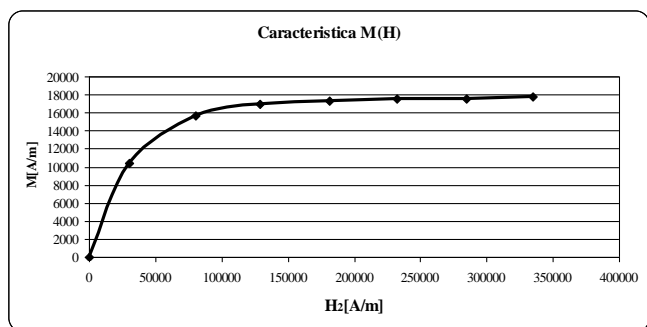


Fig. 4. Curba de magnetizare pentru modelul experimental

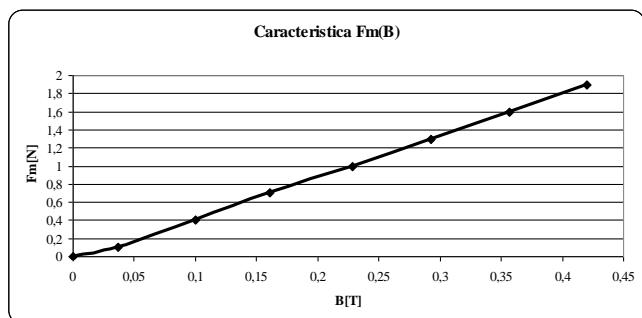


Fig. 5. Caracteristica $F_m(B)$ pentru modelul experimental

IV. CARMEL – MODEL 3D

Echipa de Modélisation Etude et Conception de Systèmes Electrotechniques (MECOSYEL), din cadrul laboratorului L2EP a elaborat un cod de program numit Carmel. Acest cod este dedicat modelării tridimensionale a dispozitivelor electromagnetice guvernate de ecuații derivate parțiale. Pentru a fi interpretate rezultatele obținute sunt necesare cunoștințe de configurarea proceselor și cunoștințe de bază ale instrumentelor folosite în fiecare etapă de modelare.

Software-ul I-DEAS este folosit în laboratorul L2EP, pentru a realiza geometria și mesh-ul pentru sisteme de studiu. Mai mult, acesta este utilizat pentru vizualizarea diferitelor rezultate obținute prin metoda elementelor finite în electromagnetism. Inițial, acest software a fost destinat în

special pentru aplicații de tip CAD (desen complex de piese 3D parametrice, simularea sistemelor cinematice, etc).

Pentru modelul studiat geometria cu mesh și distribuția inducției magnetice sunt prezentate în figurile 6, respectiv 7.

Pentru modelarea experimentului în CARMEL a fost nevoie de declararea condițiilor de frontieră și proprietățile materialelor. Permeabilitatea realtivă μ_r pentru „Ferrofluid” am considerat-o variabilă, iar condițiile de frontieră: permeabilitatea μ_0 pentru „Air” și permeabilitatea μ_r pentru „Fer” le-am considerat constante.

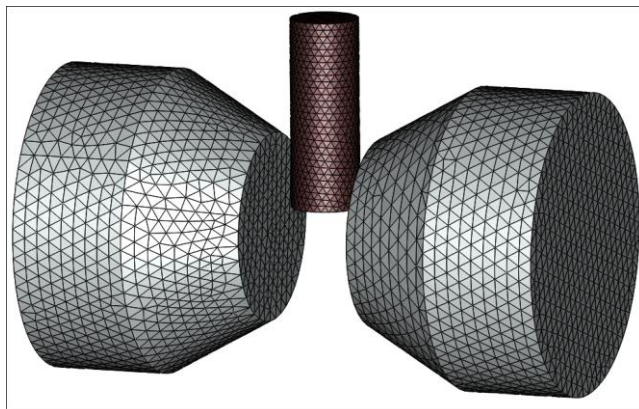


Fig. 6. Geometria și mesh pentru modelul 3D

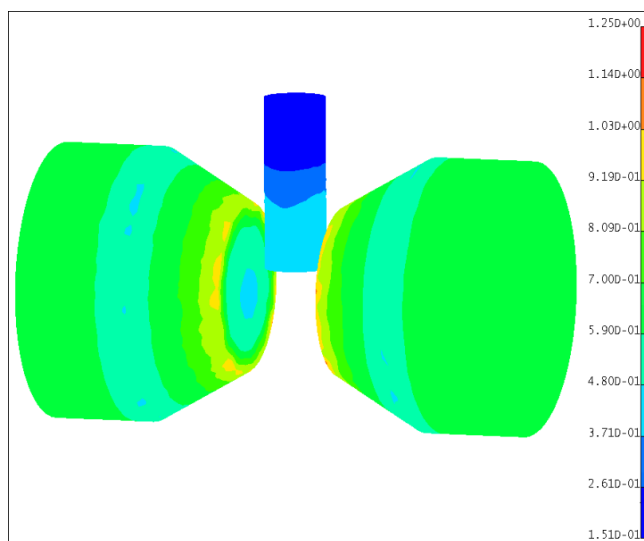


Fig. 7. Distribuția inducției magnetice în modelul 3D

Implementăm formula lui Marrocco pentru calculul intensității câmpului magnetic în codul CARMEL, iar rezultatele sunt prezentate în tabelul 3.

$$H = \frac{B}{\mu_0} \left[\frac{B^{2\alpha}}{B^{2\alpha} + \tau} (c - \varepsilon) + \varepsilon \right] \quad (7)$$

În expresia (4) identificăm coeficienții: ε , c , α and τ . Acești coeficienți influențează valoarea H astfel încât

caracteristica B(H) rezultată din simulare, să se suprapună peste caracteristica B(H) rezultată din modelul experimental. Acest lucru este posibil utilizând opțiunea “solver” din Microsoft Excel. Valorile acestor coeficienți pentru modelul studiat sunt:

- $\varepsilon = 4.42e-01$
- $c = 0.971675467$
- $\alpha = 7.63e-01$
- $\tau = 0.031079044$

Calculul magnetizației M pentru ferrofluidul folosit este realizată cu formulele (8) și (9).

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \Rightarrow B = \mu_0 (H + M) \quad (8)$$

$$H + M = \frac{B}{\mu_0} \Rightarrow M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (9)$$

TABELUL 3. REZULTATE MODEL 3D

B[T]	F[N]	H[A/m]	M[A/m]
0	0	0	0
0,038	0,104	16242,47114	13996,89733
0,101	0,415	56519,76057	23853,29774
0,162	0,698	102510,4314	26404,77108
0,23	1,04	155890,8216	27136,93493
0,295	1,32	207360,4436	27392,5485
0,36	1,609	258829,4101	27648,81753
0,419	1,92	305455,8322	27972,99385

Caracteristicile obținute sunt prezentate în figurile 8, 9 și 10.

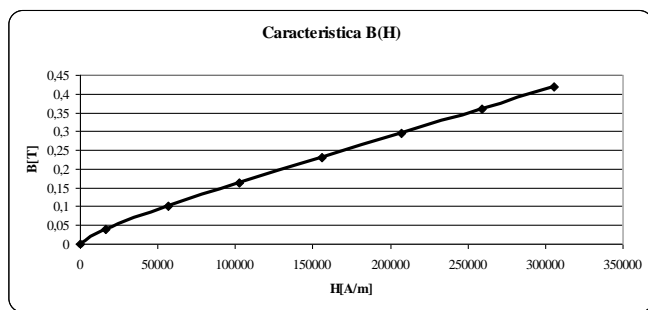


Fig. 8. Caracteristica B(H)

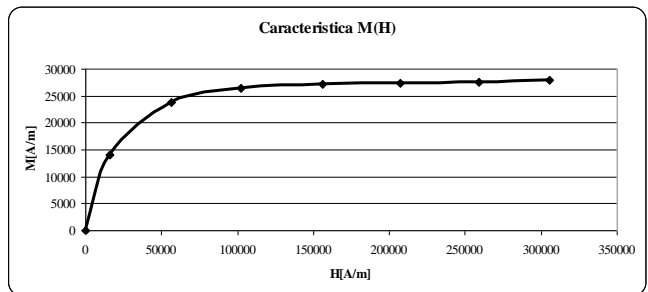


Fig. 9. Caracteristica M(H)

Pe caracteristica de magnetizare prezentată în figura 9 observăm că maximum acesteia se apropie de valoarea de catalog a magnetizației de saturație a ferrofluidului folosit. Din acest punct de vedere considerăm modelul 3D corect.

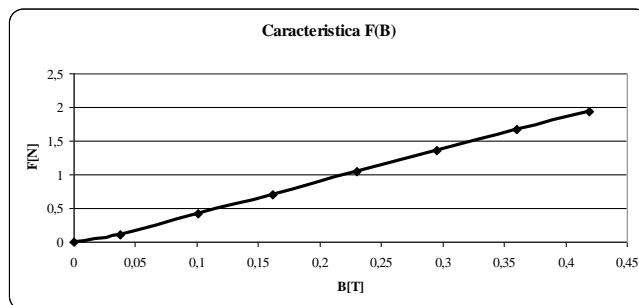


Fig. 10. Caracteristica F(B)

V. CONCLUZII

Rezultatele obținute, sunt bune, deoarece la modelul 3D, caracteristica de magnetizare se apropie de valoarea de catalog pentru magnetizația de saturație a tipului de ferrofluid folosit (vezi fig. 9). Dacă analizăm graficul din figura 4, valoarea este la aproximativ la jumătatea valorii de catalog, ceea ce e și normal, fiindcă folosim și calculăm magnetizație medie a ferrofluidului.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- [1]. Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics, Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [2]. Zimmels Y. The Bernoulli Equation for Fluids in Electromagnetic and Interfacial Systems, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 125, No. 2, October 1988.
- [3]. Odenbach S. Ferrofluids/magnetically controlled suspensions, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 217 (2003) 171_178, Elsevier Science B.V.
- [4]. Luca E., Călugăru Gh. s.a., Aplicațiile ferrofluidelor în industrie, București, Editura Tehnică, 1978.
- [5]. Odenbach S., Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluid, Springer, 2009.
- [6]. Odenbach S., Ferrofluids magnetically controlled suspensions, Colloids and Surfaces, A: Physicochem. Eng. Aspects, vol. 217, no. 171/178, Elsevier, 2003.
- [7]. Pop L., Odenbach S, s.a., Microstructure and rheology of ferrofluids, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 289, pp. 303–306, Elsevier. 2005.
- [8]. Călărașu D., Ciobanu B., Fmecanica fluidelor. Aplicațiile ferrofluidelor, Iași: Editura Tehnică, Științifică și Didactică CERMI, 2005.
- [9]. www.ferrotec.com/index.php?id=audioFluid&vfp_id=49