

# Aspecte privind uscarea biomaterialelor granulare în procedee intensive

## I. Dinamica stratului fluidizat în prezență de material inert

ALINA MONICA MARE<sup>a\*</sup>, GABRIELA ISOPENCU, COSMIN JINESCU

Universitatea Politehnică București, Facultatea de Inginerie Chimică, Splaiul Independenței Nr. 313, 77206, București, România

*Present paper has as objective the experimental study regarding the study on the dynamic parameters of modified fluidized bed. For the granular biomaterial processing by drying there are necessary intensification techniques to avoid the thermal degradation. Present paper propose as intensification technique the modified fluidized bed (or flotation -fluidized bed) in which the granular biomaterial is mixed with inert material of small sizes. The purpose is to obtain the better dynamic conditions for the drying process.*

*Keywords: granular biomaterial, inert particle, modified fluidized bed*

Numeroase materiale solide sunt supuse unor operații de tratare termică în vederea realizării unor procese tehnologice, de prelucrare și conservare, în scopul utilizării ca produs finit. Dintre procesele de prelucrare, uscarea materialelor solide reprezintă o operație energo-intensivă cu importanță semnificativă în industrie. Marea varietate a proprietăților fizice și chimice ale materialelor supuse uscării, creează dificultăți suplimentare în cercetarea experimentală și teoretică a operației, precum și în alegerea corespunzătoare a procedurii și utilizării de uscare. Desfășurarea operației de uscare fiind puternic influențată de condițiile de contactare agent de uscare-granule și de structura materialului supus uscării, a condus la dezvoltarea unui număr mare de procedee și utilaje de uscare.

În procedeele intensive de uscare, se urmărește realizarea unui contact uniform între agentul termic și granulele de biomaterial care se realizează în structuri ale stratului relativ omogene. Acest deziderat este impus de faptul că în tratarea termică a biomaterialelor pot avea loc degradări semnificative ale calității produsului final.

Procedeele intensive de uscare a materialelor solide granulare sunt procedee convective care impun, pentru păstrarea proprietăților biochimice, utilizarea temperaturilor relativ joase ale agentului termic și durate relativ mici de operare; în acest caz, pentru creșterea vitezei globale a procesului este necesară utilizarea tehnicilor de intensificare a proceselor de transfer de proprietate - energie și masă. Dintre acestea, recomandabile pentru granulele de biomaterial, sunt tehnica stratului fluidizat simplu sau modificat (*pulsat, vibro-fluidizat, utilizare de material inert*) [1-3] și tehnica *stratului străpuns* [4].

Studiile teoretice și experimentale întreprinse [5-8] abordează până în prezent aleator aspecte hidrodinamice, de transfer de masă și căldură, în *operațiile de tratare termică*: uscare prin convecție, prin iradiere IR, acoperiri cu pelicule, liofilizare, înghețare, în funcție de natura biomaterialului utilizat; prezintă de asemenea, rezultate particulare aplicând pentru un singur material un singur procedeu de contactare agent de uscare - material granular, de exemplu: strat fix, strat fluidizat și fluidizat modificat în uscarea convectivă, fără o evaluare comparativă a eficienței globale a procesului, care să ia în considerare și aspecte legate de prezervarea calităților biochimice ale produsului.

Utilizarea *stratului fluidizat* ca tehnică de intensificare la *tratarea termică* a materialelor granulare are numeroase avantaje determinate de condițiile hidrodinamice avantajoase și de aria mare de transfer gaz - particulă solidă, dar ridică probleme din punct de vedere al operării stratului, în principal:

- necesitatea unor viteze mari ale agentului de uscare pentru realizarea stării fluidizate;
- o structură neuniformă a stratului, din cauza dimensiunilor mari ale granulelor [9].

O variantă de contactare în care viteza de realizare a unei structuri dinamice favorabile transferului de masă și de căldură la vitezele ale agentului de uscare mai mici ca în stratul fluidizat este *stratul străpuns*. Stratul străpuns se realizează în coloane cilindrice sau cilindro-conice, caz în care agentul de uscare pătrunde printr-un orificiu de la baza coloanei, sub forma unui jet central. Structura stratului străpuns se caracterizează prin circulația ascendentă a particulelor solide în zona centrală și descendentă în zona înelară; în funcție de natura particulelor solide pot apărea zone de aglomerare cu structură de strat fix în care procesele de transfer de căldură și masă decurg cu viteză mică, conducând în ansamblul operației la calitatea neuniformă a produsului finit [4].

Comparând diversele procedee de intensificare recomandate pentru tratarea termică a bio-materialelor, prezenta lucrare are ca obiectiv intensificarea uscării biomaterialelor granulare de tip semințe sau boabe, care se încadrează în categoria **D** din clasificarea dimensională dinamică Geldart [4], prin tehnica stratului fluidizat modificat cu utilizare de material inert [10].

Materialul granular selectat pentru cercetarea experimentală este malțul, utilizat la fabricarea berii. Uscarea este o etapă importantă în procesul de prelucrare a malțului obținut prin tratarea termică a orzului germinat. În procesul de uscare a malțului se îndepărtează excesul de apă, utilizată în procesul de malțificare, exces nerecomandat și dăunător în prelucrarea ulterioară prin măcinarea malțului; o serie de restricții se impun pentru menținerea conform standardelor a proprietăților fizice, chimice și biochimice.

Ca procedeu intensiv de uscare a malțului s-a selectat tehnica de fluidizare cu material inert (nisip și particule de malțuscat măcinat, cu diametrul de particulă,  $d_p \in [0,3 - 1]$  mm).

\* email: mona\_alina@yahoo.com

**Tabelul 1**  
**PROCEDEE INTENSIVE DE CONTACTARE FLUID / SOLID**

Nr. crt.	Tipul de material/amestec	Tehnica/ condiții de operare	Proprietăți fizice material		Sursa bibliografica
			densitate particula, $\rho_p$	diametrul particulei, $d_p$	
UM			$kg/m^3$	$10^3 m$	
1.	cereale boabe - <i>porumb</i>	Fluidizare cu inert	1200	7,5	[12]
	<i>material inert - nisip</i>		2660	0,16	
2.	cereale boabe - <i>porumb</i>	Fluidizare cu inert	900	8	[13]
	<i>material inert - nisip</i>		2460	0,283	
3.	biomasă de iarbă - <i>furaj</i>	Fluidizare cu inert	138	[3,07-2,38]	[14]
	<i>material inert - nisip</i>		[1420-1596]	[0,375-0,863]	
4.	Biomasa lemnoasa ( <i>cuburi</i> )	Fluidizare cu inert	722	7,9	[15]
	<i>material inert</i> - fin		2629	[0,1-0,5]	
	- mediu		2669	[0,4-0,6]	
	nisip - grosier		2608	[0,8-1,2]	
5.	cereale boabe - <i>porumb, grâu</i>	Strat fluidizat; Aer cald 60-110 °C, $w = 2 w_{mf}$ , coloana rectangulara	Umiditate initiala, $x_i$ , 0,3 kg/kg solid		[16]
	<i>material inert - nisip</i>		-	-	
	<i>material inert - semințe de lucerna</i>		-	-	

Fluidizarea este utilizată pentru inertul adăugat ca mediu de flotație și transport al umidității malului.

Materialul inert include două caracteristici de bază:

- presupune utilizarea acestuia în amestec, împreună cu materialul tehnologic (biomaterial granular);
- realizează interacțiuni neutre cu materialul supus uscării, fără să inducă modificări asupra calității produsului final, cu excepția diminuării umidității.

La fluidizarea particulelor de nisip, forțele interparticulare sunt reduse, deoarece acest material nu prezintă fenomenul de coeziune, comportându-se la fluidizare ca un material de clasă B corespunzător clasificării Geldart.

Forțele interparticulare sunt determinate în acest caz de dimensiunile reduse ale particulelor și de umiditate. În prezența umidității, care difuzează de la boabele de mal în procesul de uscare, pot apărea și interacțiuni de tip van der Waals [11].

În cazul utilizării ca inert a particulelor de mal măcinat, apar forțe interparticulare mai mari determinate de natura chimică a materialului; cu toate acestea, selectarea tipului de inert - mal măcinat - s-a făcut din motive legate de separarea ulterioară a boabelor de mal din amestecul cu materialul inert, după procesul de uscare.

La contactarea boabelor umede de mal cu materialul inert are loc și o difuzie a umidității către particulele de inert, acestea preluând o parte din umiditate, mărind astfel aria totală de contact cu agentul de uscare. Prin reducerea gradientului de umiditate din interiorul boabelor (mal umed), se împiedică crăparea acestora, umiditatea eliminându-se treptat în timp.

Tehnica contactării în strat fluidizat simplu sau modificat (vibro-fluidizat) a fost aplicată la uscarea diferitelor tipuri de materiale granulare utilizând diferite tipuri de material inert. Importanța acordată în cercetarea experimentală

utilizării materialului inert, rezultă din faptul că au fost realizate cercetări pentru studiul dinamicii fluidizării materialelor granulare în prezența de material inert (tabelul 1).

Pe baza analizei studiilor experimentale au fost evidențiate variabilele de proces, cu implicații deosebite asupra cineticii de uscare și a calității produsului final:

-factori referitori la agentul de uscare: natura, temperatura agentului de uscare, viteza agentului de uscare, starea dinamică a stratului determinată de umiditatea inițială a agentului de uscare;

-factori referitori la materialul inert: tipul de material, dimensiunile și distribuția granulometrică, factorul de formă al particulelor și concentrația de material inert;

-factori referitori la materialul supus uscării: natura materialului (dimensiune, factor de formă, porozitate) și umiditate inițială;

-factori specifici procedurii de contactare aplicat: de ex. frecvența de vibrație la fluidizarea în strat vibro-fluidizat.

Cercetările experimentale au arătat că temperatura agentului de uscare, natura și concentrația de material inert sunt cei mai importanți factori care influențează calitatea produsului final [17].

Proiectarea optimă și operarea uscătoarelor pentru biomateriale, cu realizarea unui consum minim de energie și cu menținerea calității produsului, în special pentru materialele termosensibile, necesită cunoașterea proprietăților determinante ale materialului solid precum și a legilor care guvernează modificările acestor proprietăți în timpul îndepărtării umidității, a evoluției conținutului de umiditate în solid și a temperaturii, în special în perioada de uscare cu viteză neuniformă descrescătoare, când se realizează transportul umidității din interiorul granulelor către suprafața exterioară a acestora.

Obiectivele cercetării au fost:

-stabilirea parametrilor dinamici optimi de operare în strat fluidizat pentru amestecuri formate din particule de inert (nisip, respectiv malț măcinat) și granule de malț  
 -stabilirea unei relații de corelație care să aproximeze cu eroare cât mai mică determinările experimentale obținute.

### Partea experimentală

Cercetarea experimentală a structurilor dinamice ale stratului granular de biomateriale a avut ca principal obiectiv determinarea parametrilor dinamici pentru obținerea unei stări de contactare gaz-material granular.

Pentru a stabili influența prezenței particulelor fine de material inert asupra structurii stratului fluidizat de granule de malț s-au determinat condițiile în care apare fluidizarea incipientă a stratului mixt -bio - granule/particule de inert - în funcție de principalii parametri variabili: natura materialului inert, viteza agentului de fluidizare, fracția masică de inert din amestecul inert - bio- granule și raportul  $H_0 / D_c$  dintre înălțimea stratului fix,  $H_0$ , și diametrul coloanei,  $D_c$ .

Pentru selectarea corectă a parametrilor dinamici ai amestecului (sistemul malț - material inert), s-au determinat inițial condițiile dinamice pentru starea de fluidizare incipientă pentru particulele de material inert.

Aprecierea începutului fluidizării este în general dificilă, fiind dependentă de proprietățile particulelor solide, de geometria aparatului (coloanei) de fluidizare și de metoda de determinare a fluidizării incipiente.

Comparând metodele experimentale [4] pentru determinarea parametrilor dinamici ai stării fluidizate: viteza minimă de fluidizare,  $w_{mf}$ , și căderea minimă de presiune,  $\Delta P_{mf}$ , a agentului de fluidizare în strat, s-a selectat, ca fiind mai adecvată sistemului cercetat, metoda prin măsurarea căderii de presiune în strat a agentului de fluidizare în funcție de viteza fictivă,  $w$ , completată de observațiile vizuale, coloana de fluidizare fiind realizată din material transparent.

Rezultatele experimentale realizate la scară pilot de laborator pot fi utilizate și la scară industrială dacă temperatura și presiunea gazului nu sunt cu mult diferite. [4, 18].

### Descrierea instalației experimentale.

Pentru studiul dinamicii stratului fluidizat și cineticii de uscare s-a utilizat o instalație experimentală echipată cu aparate de măsură pentru principalii parametri de operare: debit volumetric al agentului de uscare,  $G_v$ , căderea de presiune în strat,  $\Delta p_s$  (fig. 1).

Instalația experimentală la scară pilot de laborator, a cărei schemă este redată în figura 1, este alcătuită din următoarele părți principale:

-coloana de fluidizare (5-9), inclusiv componentele de reținere a particulelor solide antrenate de agentul de uscare (12, 13), elementele de măsură (10, 11);

-traseul agentului de fluidizare, inclusiv elementele de măsură și reglare (1-4), (14, 15).

Agentul de fluidizare, aerul atmosferic, este alimentat cu ajutorul aspiratorului (1), la un debit reglat cu autotransformatorul (2) și măsurat cu rotametrul (4), în coloana de fluidizare (5). Consumul de energie necesar transportului agentului de uscare prin instalație este înregistrat cu contorul electric (3).

Coloana de fluidizare (5), aparat tip coloană, confecționată din sticlă pentru vizualizarea stratului de bioparticule, de diametru interior  $D = 60$  mm, este prevăzută la partea inferioară cu un strat de inele Raschig de sticlă (6) pentru distribuția uniformă a agentului de uscare și cu sita (7), suport pentru particulele de biomaterial (8), iar la partea superioară, cu dopul de teflon (9). Înălțimea stratului de particule biomateriale este măsurată cu ajutorul rigletei (10).

Agentul de uscare parcurge ascendent coloana (5) străbătând stratul de particule, fix sau fluidizat în funcție de debitul volumetric al agentului de uscare, ieșind pe la partea superioară a acesteia; căderea de presiune în coloană, implicat în stratul de biomaterial este măsurată la manometrul diferențial (11).

Agentul de uscare la ieșirea din uscătorul (5) parcurge cicloul (12) pentru separarea eventualelor particule solide antrenate din strat, particule ce sunt colectate în sacul (13) confecționat din tifon. Analiza agentului de fluidizare la ieșirea din coloana de fluidizare se realizează prin intermediul dispozitivelor (14, 15).

### Date de material.

Proprietățile fizice ale materialelor solide utilizate: diametrul mediu al particulelor solide,  $d_p$ , densitatea specifică a solidului,  $\rho_p$ , factorul de formă,  $\Psi$ , și umiditatea inițială,  $u$ , a particulelor solide raportată la materialul uscat, au fost determinate experimental și sunt prezentate în tabelul 2.

Nisipul și, respectiv malțul măcinat, utilizate ca material inert, au fost uscate în prealabil în etuvă (nisip -practic până la umiditate finală 0%; malț măcinat - până la umiditatea de 0,04 kg/kg). Agentul de uscare a fost aerul cu conținut inițial de umezeală,  $y_0 = 0,013 \text{ kg}_{\text{apa}} / \text{kg}_{\text{aer uscat}}$ , determinată prin metoda psihrometrică. Densitatea particulelor fine de

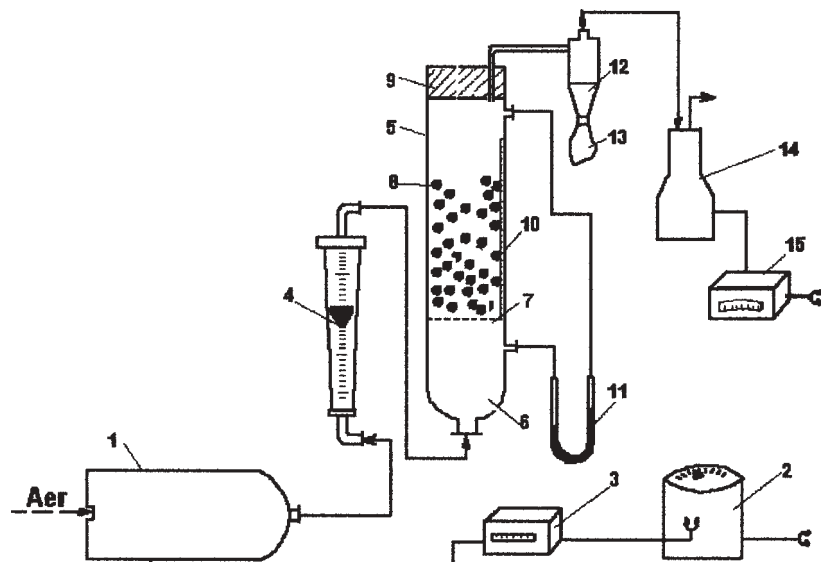


Fig. 1. Instalația experimentală utilizată pentru studiul parametrilor dinamici ai stratului de materiale granulare pure și amestecuri material granular-material inert

**Tabelul 2**  
**PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE MATERIALELOR PURE UTILIZATE**

Nr.crt.	Denumire material	Simbol material	Proprietățile particulelor solide			
			Diametrul mediu	Densitate	Factor de formă	Umiditate inițială
			$d_p$	$\rho_p$	$\Psi$	$u_0$
UM			$10^{-3} m$	$kg/m^3$	-	$kg_{apa}/kg_{mat.uscat}$
1.	Malț (granule)	M	3	1146	0,70	0,04
2.	Material inert – nisip uscat	N	0,150	2400	0,70	0,00
3.	Material inert - malț măcinat (spart) uscat	MS1	0,375	900	0,84	0,04
		MS2	0,550	900	0,84	0,04
		MS3	1,000	900	0,80	0,04

**Tabelul 3**  
**PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE AMESTECURILOR MALȚ - MATERIAL INERT UTILIZATE**

Nr. crt.	Material/Amestec	Proprietăți fizice			
		$x_{v,i}$	$x_{v,M}$	$\bar{d}_{am}$	$\rho_{am}$
		-	-	$10^{-3} m$	$kg/m^3$
1.	M+N	0,88	0,12	0,650	2252,14
2.	(M – MS1) <sup>1</sup>	0,77	0,23	0,840	944,61
3.	(M – MS1) <sup>2</sup>	0,56	0,44	1,030	984,54
4.	(M – MS2) <sup>1</sup>	0,77	0,23	0,820	944,61
5.	(M – MS2) <sup>2</sup>	0,56	0,44	1,120	984,54
6.	(M – MS3) <sup>1</sup>	0,77	0,23	1,086	944,61
7.	(M – MS3) <sup>2</sup>	0,56	0,44	1,320	984,54

1, 2 – corespund amestecurilor cu fracțiile volumetrică de malț de 0,23; 0,44.

malțmăcinat a fost determinată prin metoda Abrahamsen-Geldart (1980), fiind bazată pe ipoteza că fracția de goli minimă este identică cu particulele de formă și dimensiune similară, utilizând particule de control de densitate cunoscută [4].

Valoarea factorului de formă,  $\Psi$ , calculată pentru nisip este de 0,7 (Allen, 1975) iar pentru materialul inert - malț măcinat s-a considerat asemănătoare cu cea a particulelor de sare:  $\Psi=0,84$  [4].

Amestecurile de material inert și granule de malț utilizate în studiul dinamic au o fracție masică de granule de malț  $x_M$ , respectiv volumetrică de granule de malț  $x_{v,M}$ , cuprinsă între 0,12-0,44 (tabelul 3) și fracția de inert,  $x_i$ , respectiv fracția volumetrică de inert,  $x_{v,i}$ , cuprinsă între 0,59-0,88.

Diametrul mediu de volum pentru amestecul de malț-inert s-a calculat utilizând relația de calcul prin ponderarea diametrelor particulelor de material pure, considerând factorul de formă și fracția volumetrică,  $x_{v,i}$  [19-21].

$$d_{v,a} = d_{p,i} \cdot x_{v,i} \cdot \Psi_i + d_{p,M} \cdot x_{v,M} \cdot \Psi_M \quad (1)$$

Densitatea amestecului inert-granule,  $\rho_{am}$ , s-a calculat prin relația de pondere masică:

$$\frac{1}{\rho_{am}} = \frac{x_i}{\rho_i} + \frac{x_M}{\rho_M} \quad (2)$$

### Rezultate și discuții

Determinările experimentale privind hidrodinamica stratului, au constat în măsurarea pentru fiecare valoare a debitului volumetric de agent de fluidizare (aer),  $G_v$ , până la valori de aproximativ cinci ori debitul minim de fluidizare,  $G_{v,fl}$ , a următorilor parametri: înălțimea stratului fix,  $H_0$ ; înălțimea stratului fluidizat,  $H_w$ ; căderea de presiune totală,  $\Delta p_t$ , urmărindu-se vizual aspectul și structura stratului. Valorile pentru  $H_w$  și  $\Delta p_t$ , reprezintă media a câte trei determinări experimentale care nu au variat între ele cu mai mult de 5%. Pentru urmărirea fenomenului de histeresis, se fac citiri ale căderii de presiune la creșterea și la micșorarea debitului de aer. Pentru a evita măsurători greșite prin variația căderii de presiune,  $\Delta p_o$ , în instalația goală, din cauza unor eventuale înfundări parțiale ale sitei distribuitoare, s-a verificat menținerea valorilor pentru  $\Delta p_o$ , după fiecare set de experimentări; s-au reținut măsurătorile pentru care valoarea pentru  $\Delta p_o$  rămâne aceeași înainte și după determinare.

Determinările experimentale au avut drept scop stabilirea următorilor parametri: viteza minimă de fluidizare a amestecurilor malț-material inert; viteza de operare, căderea de presiune minimă, fracția de goli, în funcție de raportul  $H_0/D_c$  ( $H_0$  - înălțimea stratului fix,  $D_c$  - diametrul



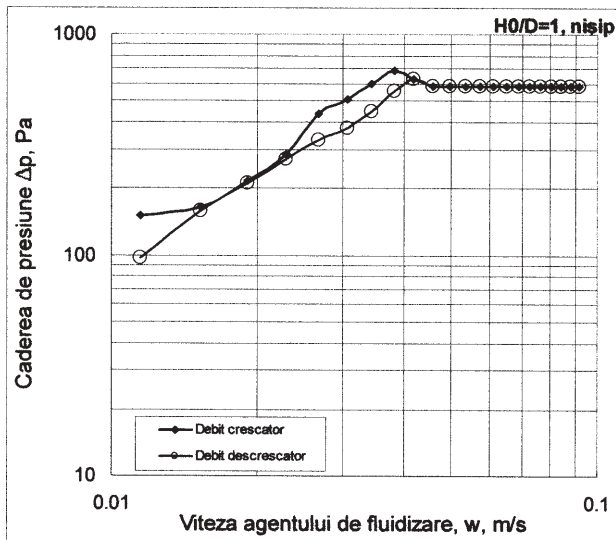


Figura 2. Diagrama de fluidizare pentru nisip, N

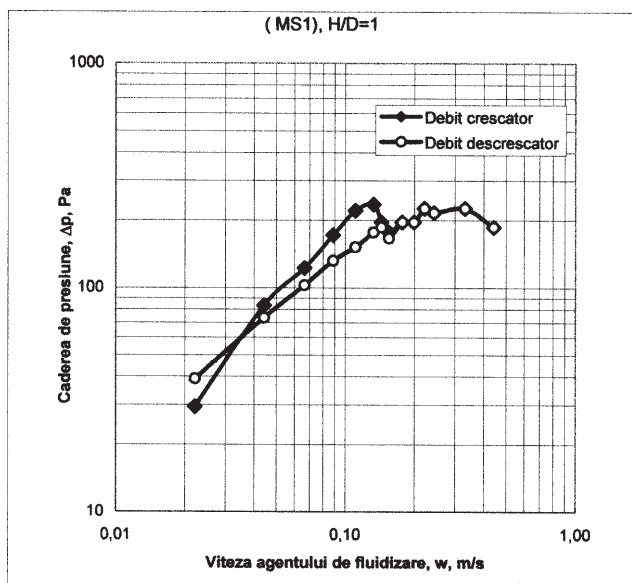


Fig. 3. Diagrama de fluidizare pentru malț măcinat, MS1

interior al coloanei de fluidizare), de natura și concentrația masică a inertului.

Determinarea experimentală a vitezei minime de fluidizare s-a realizat prin observații vizuale și din diagramele care reprezintă dependența logaritmică între căderea de presiune în strat,  $\Delta p_s$ , și viteza fictivă a gazului,  $w$ . Căderea de presiune în strat,  $\Delta p_s$ , s-a calculat prin diferența între căderea de presiune totală, măsurată la manometrul diferențial și căderea de presiune în instalația goală,  $\Delta p_o$ .

În figurile 2, 3, se prezintă diagramele  $\Delta p$ - $w$  pentru straturile de inert – nisip și malț măcinat iar în figurile 4, 5 sunt prezentate exemple de diagrame pentru straturile mixte, inert - granule de malț la diferite rapoarte  $H_0/D_c$ .

Operațiile descrise anterior s-au realizat, pentru seriile de determinări stabilite, în primul rând pentru materialele pure, prezentate în tabelul 4a, cât și pentru amestecul biomaterial - inert (tabelul 4b), principalii parametri variabili fiind natura materialului și raportul  $H_0/D_c$ .

Pentru a stabili influența forțelor suplimentare introduse de prezența materialului solid inert asupra fluidizării incipiente, valorile experimentale ale vitezei minime de fluidizare au fost comparate cu valorile teoretice calculate cu relații uzuale din literatura de specialitate:

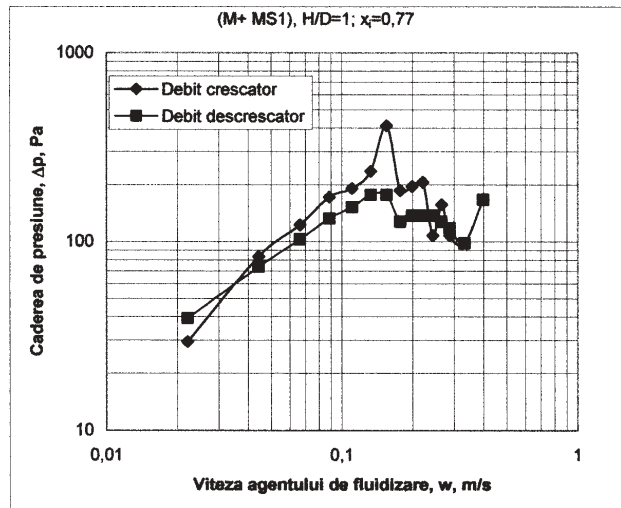


Fig. 4. Diagrama de fluidizare pentru amestecul (M-MS1) la un raport  $H_0/D_c = 1$  și o fracție de inert de 0,77

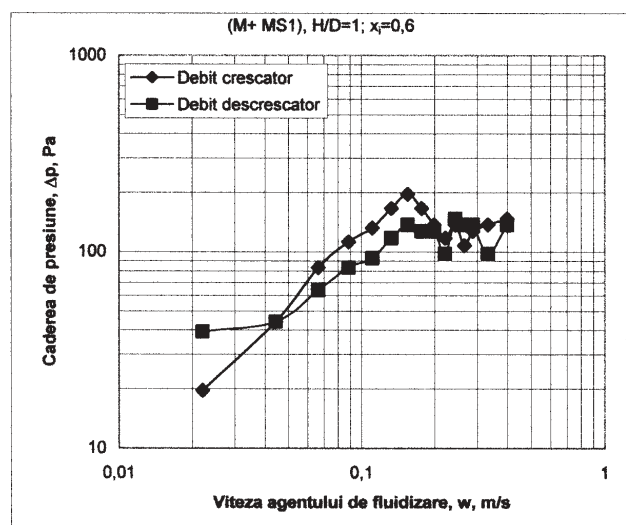


Fig. 5. Diagrama de fluidizare pentru amestecul (M-MS1), la un raport  $H_0/D_c = 1$  și o fracție de inert de 0,6

pentru materialele pure [4]:

- ecuația Rowe:

$$w_{mf} = 0,00081 \cdot \frac{(\rho_p - \rho) \cdot g \cdot (\Psi \cdot d_p)^2}{\eta} \quad (3)$$

- ecuația Leva:

$$w_{mf} = 9,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(\Psi \cdot d_p)^{1,8824}}{v^{0,8824}} \cdot \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{0,9412} \quad (4)$$

- ecuația Lewis:

$$w_{mf} = \frac{1}{200} \cdot \frac{\varepsilon_0^3}{1 - \varepsilon_0} \cdot (\Psi \cdot d_p)^2 \cdot \rho_p \cdot \frac{g}{\eta} \quad (5)$$

în care:

$\rho$  este densitatea agentului de fluidizare,  $\text{kg/m}^3$ ;

$g$  - accelerația gravitațională,  $\text{m/s}^2$ ;

$\eta$  - viscozitatea agentului de fluidizare,  $\text{Pa s}$ ;

$v$  - viscozitatea cinematică a agentului de fluidizare,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\varepsilon_0$  - fracția de goluri a stratului,  $\text{m}^3 / \text{m}^3$ .

Pentru amestecurile material granular - material inert, s-au folosit ecuațiile Cheung [23] citat de [22-24]:

- Cheung, 1974:

$$w_{mf,am} = w_{mf,M} \cdot \left( \frac{w_{mf,i}}{w_{mf,M}} \right)^{x_i^2} \quad (6)$$

**Tabel 4a**  
PARAMETRII VARIABILI AI SERIILOR DE DETERMINĂRI EXPERIMENTALE (MATERIALE PURE)

Seria determinărilor	Material	Date experimentale			Viteza minimă de fluidizare calculata		
		$H_0 / D_c$	$w_{mf, experimental}$	$\Delta p_m$	Ecuatii [4]		
		-	m/s	Pa	(3)	(4)	(5)
UM							
0	1	2	3	4	5	6	7
1.	Nisip (N)	0,75	0,042	465	0,012	0,007	0,008
2.		1,00	0,0428	580			
3.		1,15	0,0535	720			
4.		1,32	0,057	1005			
5.	Malț (M)	-	-	-	4,548	1,904	0,531
6.	Malț măcinat (MS1)	0,75	0,11	181,12	0,039	0,022	0,013
7.		1,00	0,14	186			
8.		1,15	0,22	166			
9.		1,32	0,24	264			
10.	Malț măcinat (MS2)	0,75	0,18	200	0,085	0,045	0,027
11.		1,00	0,22	220			
12.		1,15	0,26	250			
13.		1,32	0,30	390			
14.	Malț măcinat (MS3)	0,75	0,44	200	0,254	0,126	0,082
15.		1,00	0,50	230			
16.		1,15	0,55	220			
17.		1,32	0,60	300			

**Tabel 4b**  
PARAMETRII VARIABILI AI SERIILOR DE DETERMINĂRI EXPERIMENTALE (AMESTEC)

Seria determinărilor	Material	Date experimentale			Viteza minimă de fluidizare calculata	
		$H_0 / D_c$	$w_{mf, experimental}$	$\Delta p_m$	Ecuatii [23]	
		-	m/s	Pa	(6)	(7)
UM						
0	1	2	3	4	5	6
1.	N - M	1,00	0,464	730	0,026	0,02
2.	(M - MS1) <sup>1</sup>	0,75	0,180	186	0,086	0,09
3.		1,00	0,190	170		
4.		1,15	0,270	160		
5.		1,32	0,290	150		
6.	(M - MS1) <sup>2</sup>	0,75	0,16	255	0,049	0,05
7.		1,00	0,18	235		
8.		1,15	0,20	323		
9.		1,32	0,22	400		
10.	(M - MS2) <sup>1</sup>	0,75	0,22	235	0,159	0,17
11.		1,00	0,26	255		
12.		1,15	0,33	280		
13.		1,32	0,44	300		
14.	(M - MS2) <sup>2</sup>	0,75	0,22	235	0,101	0,11
15.		1,00	0,24	240		
16.		1,15	0,27	250		
17.		1,32	0,30	333		
18.	(M - MS3) <sup>1</sup>	0,75	0,44	340	0,387	0,41
19.		1,00	0,55	350		
20.		1,15	0,62	400		
21.		1,32	0,62	450		
22.	(M - MS3) <sup>2</sup>	0,75	0,33	200	0,285	0,30
23.		1,00	0,39	225		
24.		1,15	0,50	250		
25.		1,32	0,62	350		

- Cheung 1974:

$$\frac{w_{mf, am}}{x_M \cdot \rho_i + x_i \cdot \rho_M} \cdot \rho_i = \left( \frac{w_{mf, M} \cdot \rho_i}{\rho_M \cdot w_{mf, i}} \right) \quad (7)$$

În tabelele 4a și 4b sunt centralizate de asemenea valorile parametrilor dinamici pentru fluidizarea materialelor pure, respectiv pentru fluidizarea amestecurilor material granular - material inert. Pentru datele experimentale prezentate, la diferite rapoarte  $H_0/D_c$ , respectiv concentrații de material inert, valorile privind

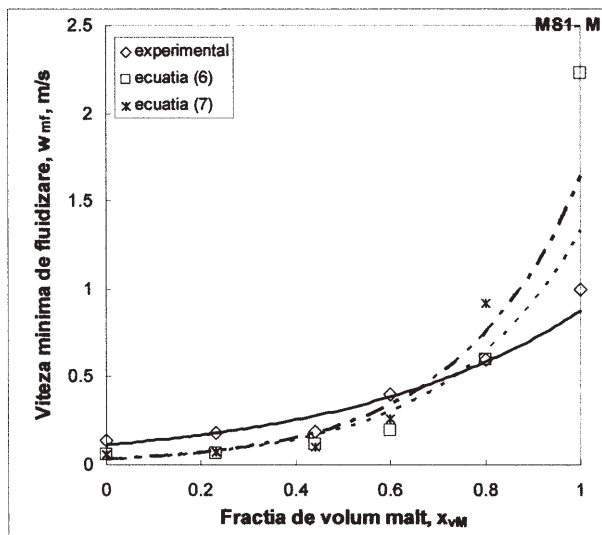


Fig. 6. Comparație între valorile experimentale și valorile obținute utilizând ecuații teoretice (ec.6, ec.7), pentru amestecul (M - MS1)

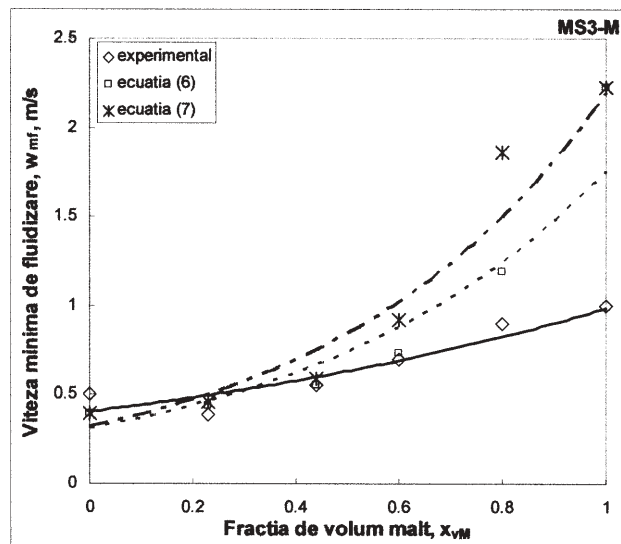


Fig. 8. Comparație între valorile experimentale și valorile obținute utilizând ecuații teoretice (ec.6, ec.7), pentru amestecul (M - MS3)

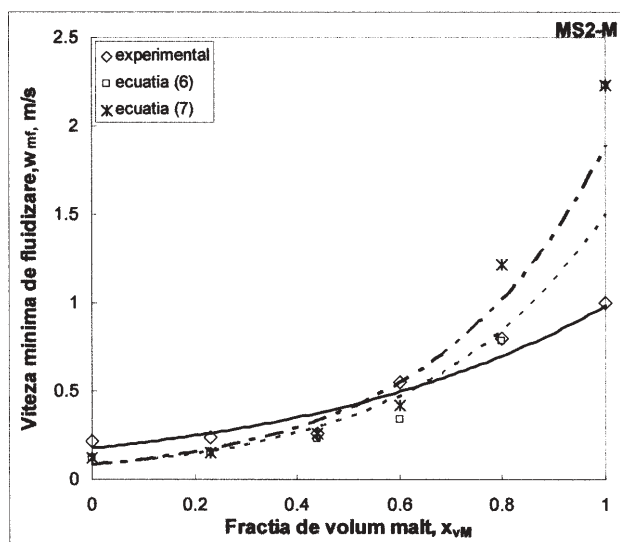


Fig. 7. Comparație între valorile experimentale și valorile obținute utilizând ecuații teoretice (6, 7), pentru amestecul (M - MS2)

datele dinamice teoretice, s-au obținut amendând valoarea diametrului particulelor solide, respectiv a amestecurilor cu valoarea factorului de formă corespunzător.

Variația valorilor pentru parametrii care caracterizează fluidizarea incipientă, viteza minimă de fluidizare și căderea de presiune în strat, se explică prin interacțiunea forțelor inerțiale - puternic influențate de dimensiunea și concentrația granulelor, respectiv a forțelor de frecare - determinate de dimensiunile particulelor de material inert și influențate de natura acestora (anorganică - nisip, organică - malț măcinat) precum și de concentrația particulelor de material inert.

Din analiza datelor experimentale privind fluidizarea incipientă se observă:

- creșterea valorilor obținute pentru căderea de presiune în strat, funcție de natura (densitatea) materialului supus fluidizării;

- creșterea valorilor obținute pentru viteza minimă de fluidizare, cu creșterea diametrului particulelor de material inert;

- creșterea vitezei minime de fluidizare și a căderii de presiune, cu creșterea raportului  $H_0/D_c$ ;

- pentru amestecurile pure, valorile experimentale ale vitezei minime de fluidizare sunt mai bine approximate de ecuația Rowe; pentru calculul teoretic al vitezei minime

de fluidizare al amestecurilor, s-au folosit valorile corespundente ale vitezei calculate pentru materialele pure, approximate de ecuația Rowe;

- deoarece nici o relație din literatură nu a aproximat acceptabil valorile experimentale ale vitezei pentru amestecul malț/nisip, seria determinării (M+N), nu a fost inclusă în procesarea ulterioară a datelor;

- comparând relațiile 6 și 7 din literatură, utilizate pentru calculul vitezei minime de fluidizare a amestecurilor, valorile cele mai apropiate de datele experimentale, după cum rezulta din figurile 6, 7 și 8, se obțin cu ecuația 7.

Abaterea semnificativă dintre valorile experimentale și cele calculate se manifestă la materialul granular pur, malțul, pentru care experimental, viteza minimă de fluidizare este cu mult mai mare decât cea obținută din ecuații teoretice. Motiv pentru care s-a propus ca procedeu de intensificare a fluidizării granulelor de malț fluidizarea modificată cu particule de material inert.

În figurile 6-8 se observă că funcție de concentrația de inert ecuațiile din literatură aproximează cu eroare variabilă valorile experimentale.

Pentru amestecul (M-MS1), amestec în care inertul este material cu granulometrie mică, modelele din literatură aproximează foarte bine datele experimentale obținute pe amestecuri cu diferite concentrații de malț

Pentru amestecul (M-MS2), inertul are o granulație mai mare, modelele din literatură aproximează datele experimentale până la o fracție de malț de 0,6 în amestec cu materialul inert.

Pentru amestecul (M-MS3), aproximarea este valabilă până la o fracție de malț de 0,4. Explicația rezidă din faptul că pentru amestecuri cu conținut redus de malț dinamica materialului inert în timpul fluidizării permite susținerea particulele granulare în flotație, în timp ce pentru conținut mare de malț materialul inert nu are decât rol de a „împacheta” materialul granular, îngreunând corespunzător dinamica procedurii de intensificare.

Aplicând analiza de regresie pentru datele experimentale obținute, se propune o relație empirică pentru calculul vitezei minime de fluidizare a amestecului de biomaterial granular - material inert, funcție de parametrii variabili: raportul  $H_0/D_c$ , natura și concentrația de material inert.

Considerând ecuația Rowe pentru calculul vitezei minime de fluidizare a materialelor pure, modificată pentru particule nesferice, în ecuația empirică (8), se introduce

**Tabelul 5**  
COEFICIENȚII ECUAȚIEI EMPIRICE

Nr.crt.	Amestec	Coeficienți	Eroare medie, %
1	M- MS1	$F_R = 1,662 \cdot \left(\frac{H_0}{D_c}\right)^a \cdot \left(\frac{x_{v,i}}{x_{v,M}}\right)^b$ ; $a=0,712$ ; $b=0,367$ (10)	1,6
2	M- MS2	$F_R = 1,116 \cdot \left(\frac{H_0}{D_c}\right)^a \cdot \left(\frac{x_{v,i}}{x_{v,M}}\right)^b$ ; $a=0,832$ ; $b=0,272$ (11)	2,5
3	M- MS3	$F_R = 0,762 \cdot \left(\frac{H_0}{D_c}\right)^a \cdot \left(\frac{x_{v,i}}{x_{v,M}}\right)^b$ ; $a=0,851$ ; $b=0,115$ (12)	3,7

un factor de abatere,  $F_R$ , care ține cont de gradul de polidispersie,  $\frac{x_{v,i}}{x_{v,M}}$ , al amestecului material granular - material inert, respectiv de simplexul geometric  $H_0/D_c$  și se obține următoarea relație:

$$w_{mf,am} = F_R \cdot w_{mf,R} \quad (8)$$

Coeficienții obținuți pentru amestecuri cu raportul

$\frac{d_i}{d_p} \in [0,125; 0,34]$  și respectiv  $\frac{x_{v,i}}{x_{v,M}} = [0,2; 3,5]$  sunt:

$$F_R = 1,228 \cdot \left(\frac{H_0}{D_c}\right)^a \cdot \left(\frac{x_{v,i}}{x_{v,M}}\right)^b$$

$$a = 0,837$$

$$b = 0,221 \quad (9)$$

În figura 9 este prezentată abaterea valorilor obținute prin ecuația empirică propusă (9), față de valorile experimentale. Astfel, valorile experimentale sunt reprezentate de prima bisectoare, față de care putem compara valorile calculate cu ecuația (9) pentru amestecurile studiate. Eroarea medie este de 8%, dar pe tipuri de amestecuri aceasta diferă astfel: pentru amestecul M-MS1, (reprezentat prin \* MS1), eroarea medie este de cca. 25 %, crescând cu creșterea fracției de inert; pentru amestecul M-MS2 (reprezentat prin ◇-MS2,) eroarea medie este de 1%, iar pentru amestecul M-MS3 (reprezentat prin Δ- MS3) eroarea medie este de 40%, și scade cu creșterea fracției de inert așa cum se poate observa în figura 9. Acest fenomen se poate explica prin diferențele existente între dimensiunea particulelor de inert, care induce o pondere diferită a forțelor interparticulare în sistem.

Dacă se aplică aceeași analiză de corelație pentru fiecare amestec în parte, se obțin următoarele valori, prezentate în tabel 5, pentru coeficienții relației empirice.

Din tabelul 5 se poate observa că, odată cu creșterea diametrului particulelor de inert, crește și influența efectului de perete prin raportul  $H_0/D_c$ , pe măsură ce, concomitent, scade ponderea raportului dintre fracția de inert și fracția de material granular.

Utilizând de asemenea analiza de regresie, s-a obținut pentru calculul căderii de presiune în strat la fluidizarea incipientă, pentru amestecuri de material granular - material inert, de diferite concentrații (exprimate în fracții masice), următoarea relație empirică:

$$\frac{\Delta p_{mf,am}}{\rho_{am} \cdot g \cdot H_0} = 0,56 \cdot \left(\frac{H_0}{D_c}\right)^{0,473} \cdot \left(\frac{x_i}{x_M}\right)^{0,091} \quad (13)$$

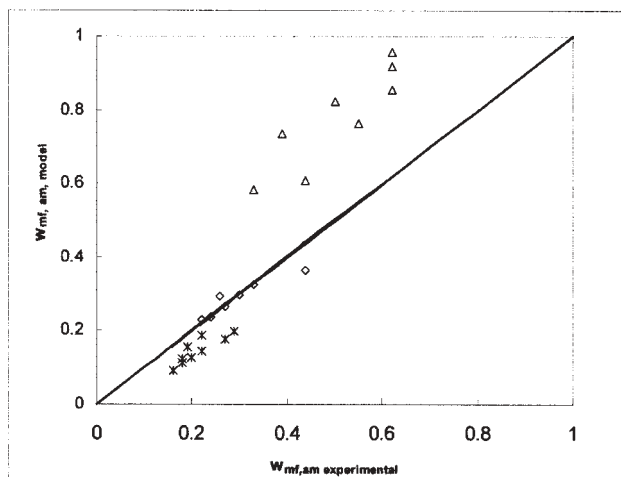


Fig. 9. Abaterea valorilor teoretice obținute prin ecuația empirică generală, (ec.9), față de valorile experimentale, obținute pentru valori diferite ale raportului  $H_0/D_c$  (\* - MS1, ◇ - MS2, Δ - MS3)

Eroarea medie a rezultatelor obținute cu relația (13), față de valorile experimentale este de 4%. Relația (13) evidențiază faptul că ponderea cea mai mare în valoarea căderii de presiune în strat o are raportul  $H_0/D_c$  ca urmare a influenței efectului de perete cât și prin greutatea corespunzătoare a stratului de material, față de raportul fracțiilor masice de inert, respectiv de material granular, a cărui pondere în expresia căderii de presiune în strat este nesemnificativă.

### Concluzii

Din analiza datelor experimentale se pot evidenția următoarele aspecte referitoare la dinamica stratului fluidizat modificat.

Amestecul (M-N) este un amestec dificil de utilizat în industria alimentară, mai ales din punctul de vedere al separării componentelor acestuia, după procesarea materialelor pure; din acest motiv prezenta lucrare propune un amestec format exclusiv din *bio - materiale*.

Parametrii dinamici analizați, în scopul stabilirii unor condiții optime de contactare pentru un proces ulterior de prelucrare/procesare a materialului granular, au fost: viteza minimă de fluidizare și căderea de presiune, în condițiile unor amestecuri cu concentrații diferite și pentru diferite rapoarte  $H_0/D_c$ .

Relațiile teoretice din literatură sunt recomandate pentru domenii înguste de variație a caracteristicilor amestecurilor particule granulare - material inert, motiv pentru care acestea aproximează satisfăcător datele experimentale.

Prezenta lucrare poate fi apreciată că aduce o îmbunătățire a restricțiilor impuse de aceste relații prin deducerea ecuației (9) din datele experimentale.



Specific tipurilor de amestec considerate s-a obținut o relație empirică pentru căderea de presiune și viteza minimă de fluidizare funcție de parametrii stabiliți. Comparând valorile experimentale cu cele rezultate din ecuația empirică (9), pentru viteza minimă de fluidizare, se observă că pentru domenii largi de diametri și de fracții de inert nu se pot obține ecuații generale de corelare, cu o eroare medie acceptabilă. Acest lucru se explică prin faptul că viteza minimă de fluidizare a amestecurilor material granular – material inert este considerabil influențată de diametrul particulelor, respectiv de ponderea de material inert în stratul de amestec.

Pentru căderea de presiune se obține o ecuație empirică (13), general valabilă pentru toate tipurile de amestec, cu o eroare medie acceptabilă; acest rezultat subliniază observația că ponderea semnificativă în valoarea căderii de presiune în strat este reprezentată de greutatea stratului de material și de influența efectului de perete.

#### Bibliografie

1. JINESCU GHEORGHIDA, Rev. Roum. Chim., **16**, 8, 1971, p.1255
2. JINESCU, GHEORGHIDA, FLOAREA, O., Rev. Chim. (București), **24**, nr. 4, 1973, p.273
3. JINESCU, GHEORGHIDA, VASILESCU, P., Rev. Chim. (București), **28**, nr. 4, 1977, p.383
4. JINESCU, GHEORGHITA, VASILESCU, P., JINESCU C., Dinamica fluidelor reale în instalațiile de proces, Ed. SEMNE'94, Bucuresti, 2001
5. JINESCU GHEORGHIDA, VASILESCU P., Rev. Chim. (București), **28**, nr.4, 1977, p.383
6. JINESCU GHEORGHIDA, BALABAN CORNELIA, MITTELU MARIANA, Rev. Chim. (București), **33**, nr. 8, 1982, p.750
7. BALABAN CORNELIA, JINESCU GHEORGHIDA, SOFONEA MARIA, Mat. Plast., **19**, nr. 4, 1982, p. 226
8. JINESCU GHEORGHIDA, IACOBINI A., Rev. Chim. (București), **39**, nr.12, 1988, p.1122
9. JINESCU, GHEORGHITA, VASILESCU, P., ISOPENCU, GABRIELA., PETRESCU, MONICA, Proceeding of International Drying Symposium, IDS'2002, Beijing, China, v. A, 2002, p.596
10. JINESCU GHEORGHITA, VASILESCU, P., PETRESCU, MONICA., ISOPENCU GABRIELA., Proceedings of 10<sup>th</sup> Drying Symposium, Lodz, Polonia, 2003, p.519
11. ISOPENCU GABRIELA, MARES MONICA, JINESCU GHEORGHITA, U.P.B., Sci. Bull., Series B, v.69, no.3, 2007
12. NASCIMENTO, F.R., GOMES, A.P.S., ALMEIDA, M.M., SILVA, G.F., Revista Brasileira de Produtor Agroindustrials, Campina Grande, v.3, nr.1, 2001, p.7
13. HEMATI, M., MOURAD, M., STEINEMETZ, D., LAGUERIE, C., Proceedings of Fluidization VII, 1992, Brisbane, p.831
14. PATIL, K.N., BOWSER, T.J., BELLMER, D.D., HUHNKE, R.L., Agr. Engng. Intl., v.VII, 2005
15. RAMAKERS, B.J., RONNY de RIDDER, KERKHOF J.A.M., Proceedings of 14th International Drying Symposium, IDS 2004, v.B, 2004, p.1337
16. COBBINAH, S., ABID, M., LAGUERIE, C., GIBERT, H., Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Drying, Drying'87, Ed. A.S. Mujumdar, 1987, p.24
17. BRATU, Em., JINESCU, GHEORGHITA, St.cerc.chim., 17, 9, 1969, p.699
18. FLOAREA, O., JINESCU, GHEORGHIDA, Procedee intensive în operațiile unitare de transfer, Ed. Tehnică, București, 1975
19. FINKERS, H.J., HOFMANN, A.C., AIChE Journal, 44, nr. 2, 1998, p.495
20. LEAPER, M.C., HILAL, N., KINGMAN, S.W., Advanced Powder Technol., v.15, 4, 2004, p.435
21. HOFMANN, A.C., JANSSEN, L.P.B.M., PRINS, J., Chem. Engng. Sci., 48, 1993, p.1583
22. ROWE, P.N., NIENOW, A.W., Chem. Engng. Sci., 30, 1975, p.1365
23. CHEUNG, L., NIENOW, A.W., ROWE, P.N., Chem. Engng. Sci., 29, 1974, p.1301
24. WEN, C.H., YU, Y.H., AIChJ, 12, 1966, p.610

Întrat în redacție: 14.09. 2007