

CONSIDERAȚII PRIVIND OPTIMIZAREA BILANȚULUI TERMIC AL INSTALAȚIEI DE USCARE A SEMINȚELOR ÎN PAT FLUIDIZAT

Corina CERNĂIANU

UNIVERSITATEA din Craiova, Facultatea de Mecanică

1. CONSIDERAȚII GENERALE

Pentru a cunoaște temeinic fenomenele referitoare la comportarea materialelor umede în instalațiile de uscare prin convecție sau radiație, sunt necesare cercetări experimentale care să pună în evidență influența unor parametrii specifici ai acestora cum sunt:

- temperatura în interiorul incintei de uscare;
- umiditatea relativă a agentului de uscare;
- umiditatea de echilibru a materialelor supuse uscării;
- viteza de circulație a agentului de uscare.

Pe baza cunoașterii acestor parametrii, care influențează în mod hotărâtor tehnologia de uscare, este posibil să se realizeze o optimizare corespunzătoare a procesului, care să conducă la determinarea duratei optime de uscare și a consumului de energie minim. Pentru aceasta s-a utilizat o instalație de uscare a semințelor de cereale în strat fluidizat proiectată și realizată prin eforturile proprii ale autoarei.

Prin determinări experimentale, se obțin o serie de curbe de uscare, care indică variația umidității și temperaturii materialului în timp. Determinarea umidității de echilibru a materialelor supuse uscării, aflate în cutie de uscare, s-a realizat indirect prin utilizarea

unei senzori de umiditate – temperatură cuplat la un higrometru digital introdus în masa de semințe. Astfel, elementul sensibil al traductorului a fost practic în permanent contact cu masa de semințe, aşa cum se observă în figura 1. După cum se observă în figură, intersticiul mediu al distanței dintre elementul sensibil al traductorului și semințele din imediata vecinătate este foarte mic, dar suficient ca umiditatea măsurată să fie cea de pe învelișul semințelor.

Se observă că temperatura aerului cald vehiculat prin instalația de uscare, ajunge la baza cutiei de uscare, în cutie metalică de canalizare, la o temperatură maximă de 55...65 °C. De aici, prin intermediul orificiilor și al sitei metalice este dirijat în întreaga masă de semințe. Aerul cald trimis în masa de semințe cu o viteză de fluidizare corespunzătoare, pătrunde printre acestea și la ieșire ajunge la o temperatură de 30–40 °C.

În acest fel, umiditatea indicată de higrometru reprezintă umiditatea relativă a aerului cald și umed din imediata vecinătate a semințelor. Pentru conversia datelor astfel obținute, în vederea determinării umidității de echilibru a materialului uscat, este necesară folosirea unor diagrame denumite izoterme de sorbție.

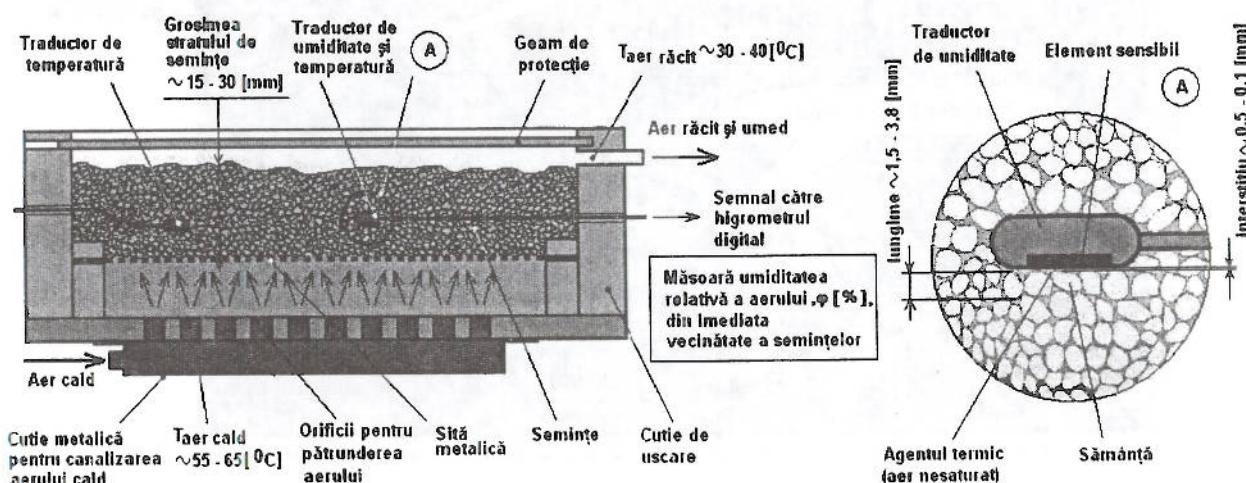


Fig. 1. Măsurarea umidității și temperaturii din masa semințelor supuse acțiunii aerului cald.

Umiditatea materialului în acest caz poartă numele de *umiditate de echilibru* U_e . Umiditatea de echilibru este o caracteristică a materialului uscat (a semințelor) și depinde de temperatură și de umiditatea relativă ϕ a aerului, adică $U_e = f(t, \phi)$. Dacă se reprezintă curba de variație $U_e = f(\phi)$ într-un sistem de axe rectangulare $U_e - \phi$, pentru o temperatură constantă a aerului, se obține o *curbă de echilibru* sau o *curbă de sorbie*. Deoarece structura semințelor și umiditatea acestora nu este uniformă, izotermele de sorbie au o valoare orientativă, dar pot fi utilizate pentru calculele tehnice uzuale. Pe baza analizei acestor curbe se pot stabili un set de date necesare pentru proiectarea instalațiilor de uscare, pentru stabilirea parametrilor tehnologici de proces și pentru optimizare în general.

Izotermele de sorbie ale semințelor de grâu, pentru temperaturile finale ale aerului de 20 și 30 °C, sunt prezentate în figura 2.

Pentru a calcula bilanțul termic al modelului de instalație de uscare, s-a considerat cazul uscării unei probe de grâu la care s-au determinat următoarele valori experimentale, măsurate cu ajutorul higrometrului electronic:

- umiditatea relativă a probei înainte de uscare: $\phi = 81\%$;
- umiditatea relativă a probei după uscare: $\phi = 54\%$;
- temperatura finală a probei: $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Analizând izoterma din figura 2 se constată că, pentru temperatura de echilibru T egală cu 30 °C, la o umiditate relativă inițială a aerului din masa de semințe de 81 %, corespunde o umiditate a semințelor de 16,3 %.

După uscare și răcire, umiditatea relativă a aerului din masa de semințe a ajuns la 54 %, ceea ce corespunde

cu o umiditate finală a semințelor de 12,1 %. Această valoare se încadrează în limitele acceptate pentru valoile umidității semințelor în vederea păstrării și conservării. În cazul păstrării masei de semințe la o temperatură medie de 20 °C, umiditatea acestora ajunge la o valoare 12,5 %, care se încadrează de asemenea în limitele acceptate.

2. OPTIMIZAREA BILANȚULUI TERMIC AL INSTALAȚIEI DE USCARE

Pe baza analizei curbelor din diagramele izotermeelor de sorbie se poate calcula bilanțul termic al unei instalații de uscare a semințelor de cereale. În figurile 3, 4, 5 și 6 se prezintă curbele de uscare ale celor patru tipuri de semințe supuse procesului de uscare în instalația de uscare cu dublă sursă de energie.

Analizând aceste curbe, se observă că variația umidității în timpul uscării respectă alura curbei teoretice, indiferent de tipul materialului, de timpul de uscare și de forma de energie utilizată pentru încălzirea instalației. Se poate calcula bilanțul termic în două cazuri: când o instalație de uscare lucrează cu recuperarea de căldură prin recircularea agentului de lucru și în cazul funcționării fără recuperarea căldurii.

Se va calcula bilanțul termic general și productivitatea instalației pentru următoarele date și parametri:

- cantitate de semințe uscate: $G_i = 1,000\text{ kg}$;
- umiditatea relativă inițială: ϕ_i aer din vecinătatea semințelor = 81 % $\Psi_{\phi_i \text{ grâu}} = 16,3\%$;
- temperatura maximă de uscare: $t_u = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- temperatura de răcire a semințelor: $t_r = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- căldura specifică a semințelor de grâu: $c_p = 2,05114\text{ kJ/kg}$.

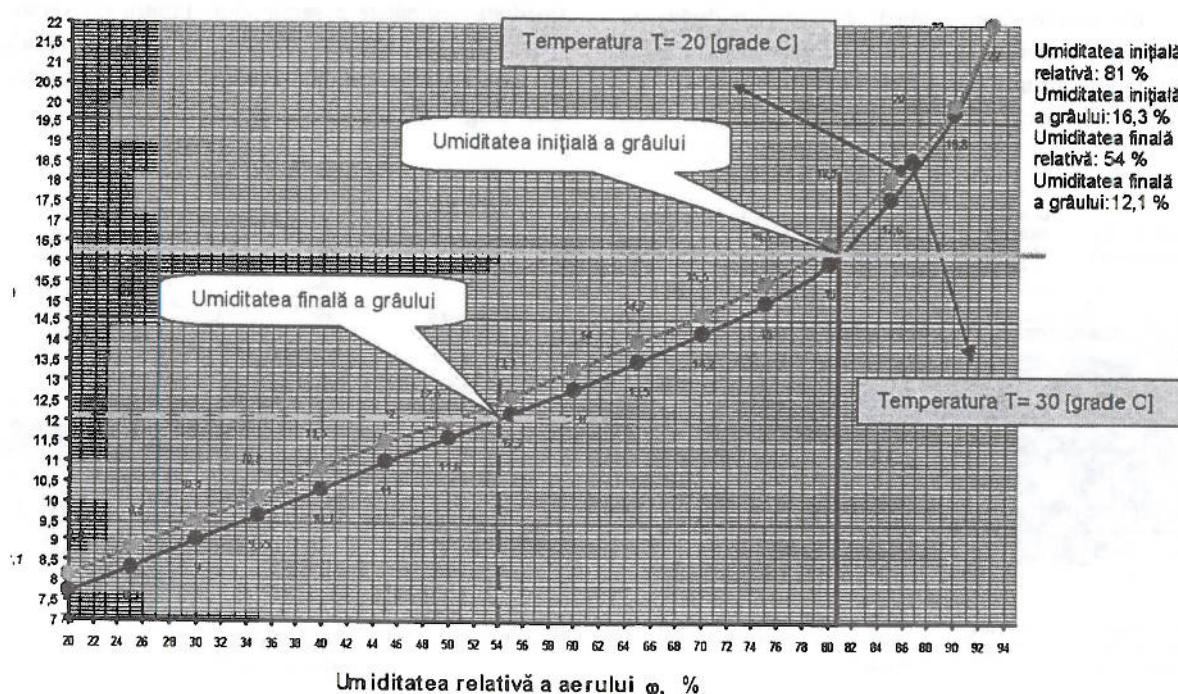


Fig. 2. Izoterma de sorbie a semințelor de grâu la 20 și 30 °C.

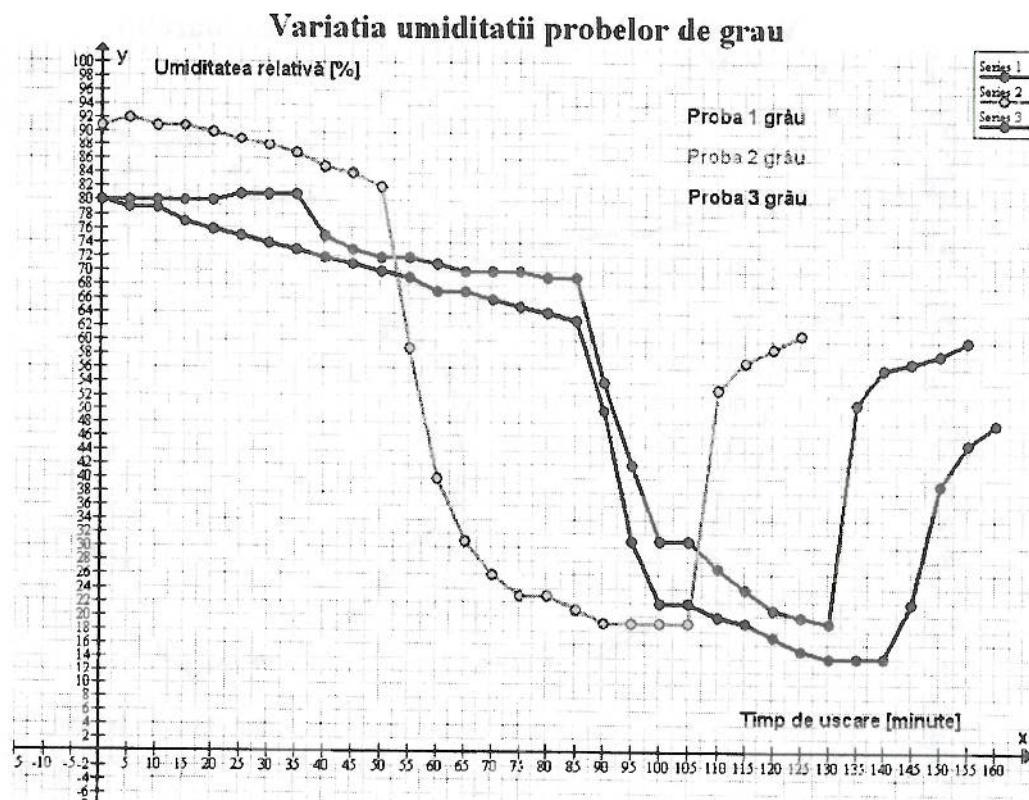


Fig. 3. Curbele de uscare ale semințelor de grâu.

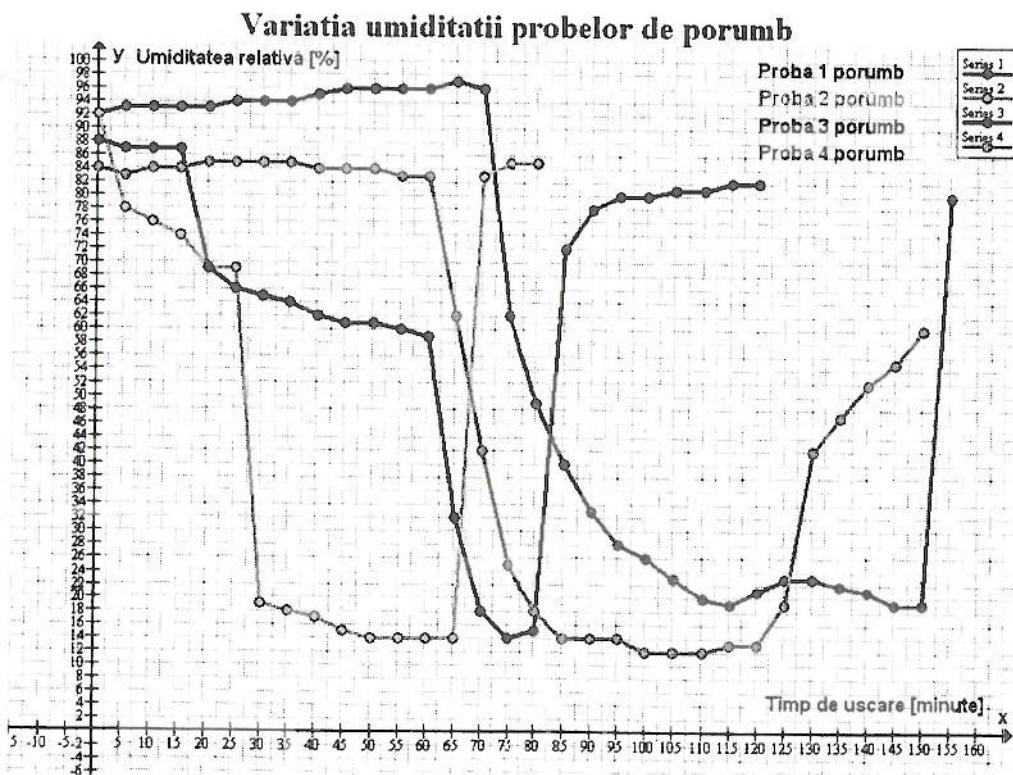
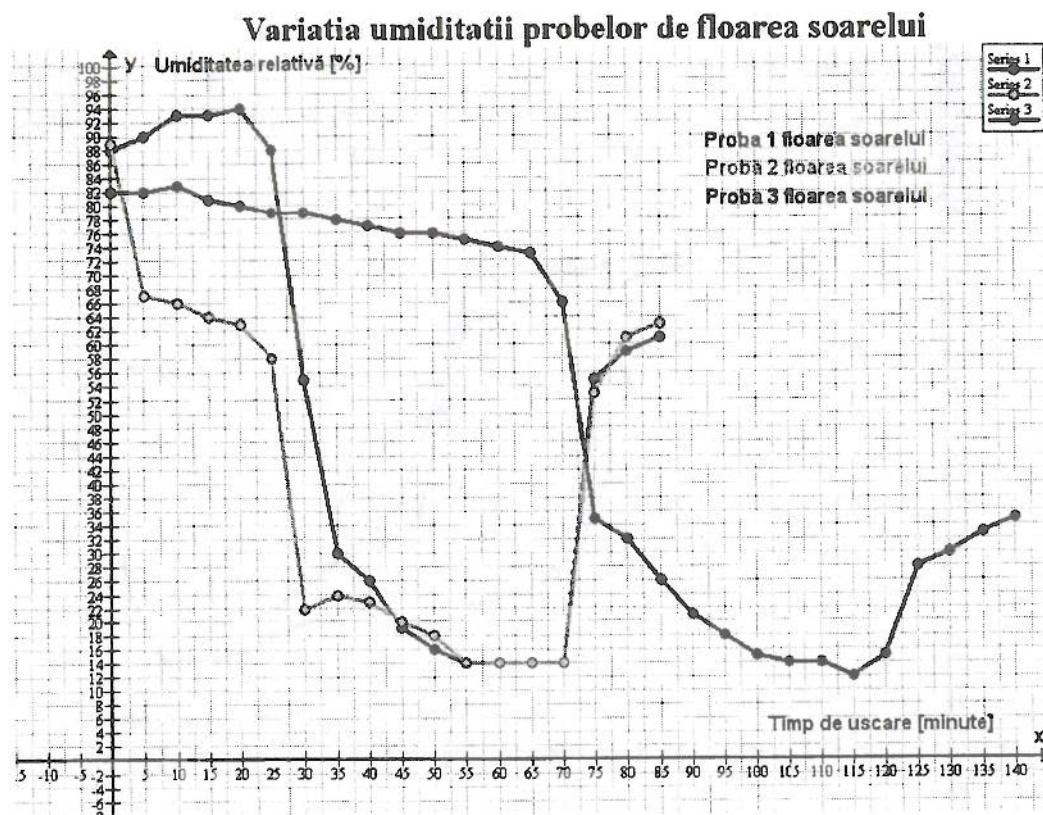
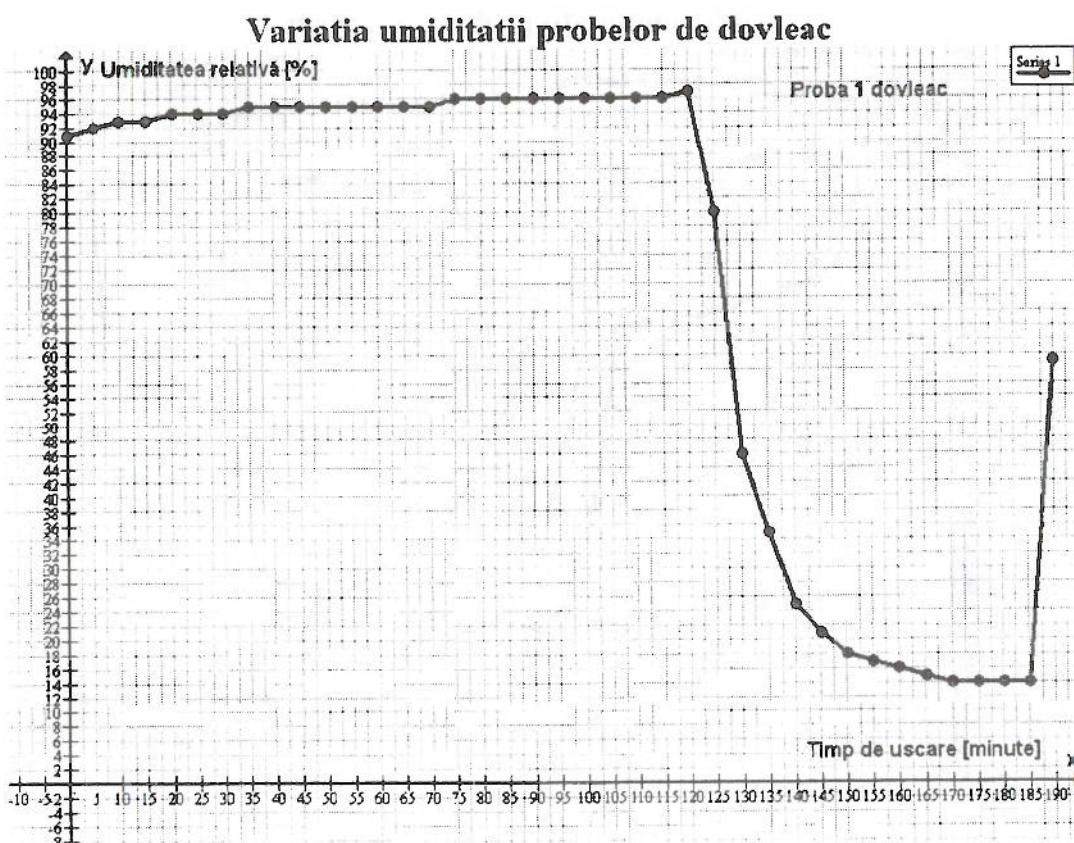


Fig. 4. Curbele de uscare ale semințelor de porumb.

*Fig. 5. Curbele de uscare ale semințelor de floarea soarelui.**Fig. 6. Curba de uscare ale semințelor de dovleac.*

Cantitatea de apă necesară a fi evaporată din masa de semințe este:

$$U_e = G_i - G_f = G_i \left(\frac{\varphi_{igrau} - \varphi_{fgrau}}{100 - \varphi_{fgrau}} \right) = \\ = 1,000 \left(\frac{16,3 - 12,1}{100 - 12,1} \right) = 0,04778 \text{ kg/h} \quad (1)$$

unde: U_e este cantitatea de apă evaporată;

G_i – greutatea inițială a semințelor, în kg;

G_f – greutatea finală a semințelor, în kg.

Greutatea finală a semințelor de grâu este:

$$G_f = G_i - U_e = 1,000 - 0,04778 = 0,952221 \text{ kg} \quad (2)$$

Se observă că această greutate calculată analitic este practic identică cu cea determinată prin cîntărirea probei de grâu după uscare, adică G_f cîntărită = 0,950 kg.

Instalația experimentală are cutie de uscare de formă paralelipipedică în care temperatura maximă ajunge la 70 °C, iar temperatura finală a masei de semințe ajunge la 20 °C.

Incinta utilă a cutiei de uscare are dimensiunile: lungimea $L = 0,275$ mm, lățimea $l = 0,220$ mm și înălțimea utilă a stratului de semințe $h = 0,025$ mm. Rezultă astfel un volum total util $V = L \cdot l \cdot h = 0,001512 \text{ m}^3$.

Pentru cazul luat în discuție, caracteristicile aerului din instalație sunt:

• aerul rece din atmosferă:

- temperatura aerului uscat: $t_{aer\ uscat} = 20^\circ\text{C}$;
- umiditatea relativă a aerului: $\varphi_{aer\ uscat} = 60\%$;
- volumul specific: $v_{s\ aer\ uscat} = 0,859 \text{ m}^3/\text{kg}$;
- conținutul de umiditate al aerului:
 $x_{aer\ atm.} = 0,00891 \text{ kg/kg}$;
- cantitatea de căldură totală (entalpia)
 $h_{aer\ uscat} = 42,65534 \text{ kJ/kg}$.

• aerul cald introdus în cutie de uscare:

- temperatura aerului cald: $t_{aer\ cald} = 70^\circ\text{C}$;
- umiditatea relativă a aerului: $\varphi_{aer\ cald} = 5\%$;
- conținutul de umiditate al aerului:
 $x_{aer\ cald} = 0,0099 \text{ kg/kg}$;
- cantitatea de căldură totală (entalpia)
 $h_{aer\ cald} = 96,4873 \text{ kJ/kg}$.

• aerul evacuat din cutie de uscare va trebui să aibă o umiditate relativă care să corespundă unei temperaturi superioare punctului de rouă, pentru a evita condensarea pe masa de cereale. Pentru o umiditate relativă a aerului de 90 %, caracteristicile acestuia sunt:

- temperatura aerului evacuat: $t_{aer\ evac.} = 30^\circ\text{C}$;
- volumul specific al aerului evacuat:
 $v_{s\ aer\ evac.} = 0,911 \text{ m}^3/\text{h}$;
- conținutul de umiditate al aerului:
 $x_{aer\ evac.} = 0,02489 \text{ kg/kg}$;
- cantitatea de căldură totală (entalpia)
 $h_{aer\ evac.} = 93,68268 \text{ kJ/kg}$.

Aerul răcit va avea o temperatură finală $t_f = 30^\circ\text{C}$.

Cantitatea de aer necesară pentru a fi introdusă în cutie de uscare se calculează cu relația:

$$L = \frac{U_e}{x_{aer\ evac.} - x_{aer\ atm.}} = \frac{0,04778}{0,02489 - 0,00891} = 2,98998 \text{ kg/h} \quad (3)$$

Această cantitate de aer corespunde următoarelor volume de aer:

– aer captat din atmosferă:

$$V_a = L(1 + x_{aer\ atm.}) v_{s\ aer\ uscat} = \\ = 2,98998(1 + 0,00891)0,859 = 2,59127 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4)$$

– aer evacuat:

$$V_e = L(1 + x_{aer\ evac.}) v_{s\ aer\ evac.} = \\ = 2,98998(1 + 0,02489)0,911 = 2,79166 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5)$$

Răcirea masei de cereale din cutie de uscare se face prin ventilarea acestora, după oprirea pătrunderii aerului cald din cutie cu roci, până când materialul care are la sfârșitul procesului temperatura de 45 °C ajunge la o temperatură de răcire $t_r = 25^\circ\text{C}$.

Cantitatea de căldură ce trebuie eliminată din masa de grâu, va fi:

$$Q_e = G_i c_p (t_u - t_r) = 1 \cdot 2,05114 \cdot (45 - 25) = 41,0228 \text{ kJ/h} \quad (6)$$

Cantitatea de căldură pierdută cu aerul evacuat, care are o entalpie de 93,68268 kJ/kg, se distribuie pentru aerul uscat și pentru apa scoasă din material:

$$h_u = 1,00464 \cdot t_f = 1,00464 \cdot 30 = \\ = 30,1392 \text{ kJ/kg} \quad \text{pentru aer uscat} \quad (7)$$

$$h_v = h_{aer\ evac.} - h_u = 93,68268 - 30,1392 = \\ = 63,54348 \text{ kJ/kg} \quad \text{pentru apă} \quad (8)$$

Aerul introdus în instalație are o entalpie totală de $h_t = 42,65534 \text{ kJ/kg}$ din care revine, conform raționamentului de mai sus, $h_{a_u} = 20,0928 \text{ kJ/kg}$ pentru aerul uscat și $h_a = 22,56254 \text{ kJ/kg}$ pentru apa evacuată.

În acest caz, cantitatea de căldură pentru încălzirea aerului uscat este:

$$Q_{aer} = L(h_u - h_{a_u}) = \\ = 2,98998 \cdot (30,1392 - 20,0928) = \\ = 30,03853 \text{ kJ/h} \quad (9)$$

Cantitatea de căldură pentru încălzirea vaporilor de apă, știind că entalpia totală este $h_{aer\ cald} = 96,4873 \text{ kJ/kg}$, are valorile:

$$h_{aer} = 1,00464 \cdot t_{aer\ cald} = \\ = 1,00464 \cdot 70 = \\ = 70,3248 \text{ kJ/kg} \quad \text{pentru aer uscat} \quad (10)$$

$$h_{apa} = h_{aer\ cald} - h_{aer} = \\ = 96,4873 - 70,3248 = \\ = 26,1625 \text{ kJ/kg} \quad \text{pentru apă} \quad (11)$$

Cantitatea de căldură necesară pentru încălzirea apei are valoarea:

$$Q_{apa} = L(h_{apa} - h_a) = \\ = 2,98998 \cdot (26,1625 - 22,56254) = \\ = 10,7638 \text{ kJ/h} \quad (12)$$

Cantitatea de căldură necesară încălzirii masei de cereale, care este evacuată o dată cu materialul uscat, are valoarea:

$$\begin{aligned} Q_e &= G_i c_{p,\text{grau}} (t_u - t_r) = \\ &= 1,000 \cdot 2,05114 \cdot (45 - 20) = \\ &= 51,2785 \text{ kJ/h} \end{aligned} \quad (13)$$

Totalul pierderilor de căldură din sistemul de uscare, reprezentând o însumare a pierderilor parțiale, are valoarea:

$$\begin{aligned} Q_{\text{pierderi totale}} &= Q_{\text{aer}} + Q_{\text{apa}} + Q_e = \\ &= 30,03853 + 10,7638 + 51,2785 = \\ &= 92,08083 \text{ kJ/h} \end{aligned} \quad (14)$$

Pentru calcularea cantității de căldură utilă din instalația de uscare se pornește de la cantitatea de căldură necesară pentru evaporarea a 0,04778 kg de apă, ținând seama de cantitatea de căldură evacuată cu apă și aerul, de cea conținută de apă din aerul introdus în instalație și de cantitatea totală de aer din aceasta.

Cantitatea de căldură evacuată este:

$$h_{\text{ev.}} = h_{\text{aer vac.}} - h_u = 93,68268 - 30,1392 = 63,54348 \text{ kJ/kg} \quad (15)$$

Cantitatea de căldură conținută de apă din aerul introdus în circuit este:

$$h_{\text{apa din aer}} = h_{\text{aer cald}} - h_{\text{aer}} = 96,4873 - 70,3248 = 26,1625 \text{ kJ/kg} \quad (16)$$

Pentru a evapora cantitatea de 0,04778 kg de apă, este nevoie de o cantitate de căldură de:

$$\begin{aligned} L(h_{\text{ev.}} - h_{\text{apa din aer}}) &= 2,98998 \cdot (63,54348 - 26,1625) = \\ &= 111,76838 \text{ kJ/h} \end{aligned} \quad (16')$$

Cantitatea de căldură recuperată din aerul evacuat din camera de uscare se calculează ținând seama de aerul necesar:

$$\begin{aligned} \text{Aerul necesar} &= \frac{Q_e}{h_{\text{aer vac.}} - h_{\text{aer uscat}}} = \\ &= \frac{41,0228}{93,68268 - 42,65534} = 0,80393 \text{ kJ/h} \end{aligned} \quad (17)$$

Căldura recuperată din aerul evacuat din camera de uscare este:

$$\begin{aligned} A \text{ nec.} \cdot (t_{\text{aer vac.}} - t_{\text{aer uscat}}) \cdot 1,00464 &= \\ &= 0,80393 \cdot (30 - 20) \cdot 1,00464 = \\ &= 8,07667 \text{ kJ/h} \end{aligned} \quad (18)$$

Cantitatea de căldură utilă din sistemul de uscare este:

$$111,76838 - 8,07667 = 103,6917 \text{ kJ/h} \quad (19)$$

În cazul funcționării instalației fără recuperarea de căldură după perioada de uscare, cantitatea de căldură este:

$$92,08083 + 111,76838 = 203,8492 \text{ kJ/h} \quad (20)$$

Pentru acest caz *randamentul instalației* este:

$$\frac{111,76838}{203,8492} = 0,54 \text{ sau } 54\% \quad (21)$$

În cazul în care instalația funcționează cu recuperarea de căldură după perioada de uscare, cantitatea de căldură este:

$$92,08083 + 103,6917 = 195,77253 \text{ kJ/h} \quad (22)$$

Pentru acest caz *randamentul instalației* este:

$$\frac{111,76838}{195,77253} = 0,57 \text{ sau } 57\% \quad (23)$$

Consumul de căldură pentru a evaca din materialul de uscare 1 kg de umiditate, având cantitatea de apă de evacuat din masa de semințe de 0,04778 kg, este:

– când instalația funcționează fără recuperare de căldură:

$$\frac{203,8492}{0,04778} = 4266,4127 \text{ kJ/kg} ; \quad (24)$$

– când instalația funcționează cu recuperarea de căldură:

$$\frac{195,77253}{0,04778} = 4097,3740 \text{ kJ/kg} . \quad (25)$$

CONCLUZII

Din cele prezentate mai sus rezultă că instalația folosită pentru determinările experimentale și prevăzută cu posibilitatea recuperării căldurii evacuate din camera de uscare, are un randament superior cazului în care nu s-ar recupera această cantitate de căldură.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bică, M., Călbureanu, M., Cernăianu, C.D., *Transfer de căldură*, Editura ICMET, Craiova, 2003.
- [2] Cernăianu, C. D., Bică, M., *Particularități ale uscării în strat fluidizat*, Conferința Națională de Termotehnică, ediția a X-a, Sibiu, 25–27 mai 2000, p.149–155, secțiunea II, Transfer de căldură și masă.
- [3] Cernăianu, C. D., Mangra, M., Cernăianu, A., *Model de instalație pentru uscarea semințelor de cerealelor și plante tehnice cu dublă sursă de energie*, la Conferința Națională de Inginerie Economică, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 21–23.03.2002.
- [4] Mănișor, P., ș.a., *Mașini și instalații pentru uscarea și condiționarea mașinilor agricole*, Editura Agro-Silvică, București, 1967.
- [5] Mihailă, C., ș.a., *Procese și instalații industriale de uscare*, Editura Tehnică, București, 1982.