

INSTITUTUL POLITEHNIC „TRAIAN VUIA” TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. AUNGURENCE NICOLAE

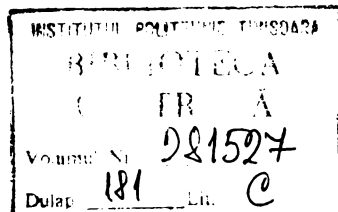
REPARTIZAREA TEMPERATURII INTR-UN
STRAT DENS DE SEMINȚE SUPUSE
USCĂRII CU AER CALD

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

TEZĂ DE DOCTORAT

Indrumător științific

Profesor emerit ing. BANARESCU MARIN



1974

BUPT

LISTA DE SIMBOLURI

- a - difuzivitatea termică, în m^2/s ;
- α - transmisivitatea termică, în $W/m^2.K$;
- a_m - aria unui bob, în m^2 ;
- c_a - căldura masică a aerului, în $J/kg.K$;
- c_m - căldura masică a unui bob umed, în $J/kg.K$;
- c_o - căldura masică a unui bob uscat, în $J/kg.K$;
- c_u - căldura masică a umezelii, în $J/kg.K$;
- D - coeficient de difuzie, în m^2/s ;
- δ - coeficient de termodifuzie, în $grad^{-1}$;
- ϵ - fracțiunea de gol din interiorul stratului ;
- e - baza logaritmilor naturali ;
- φ - umiditatea relativă a aerului, în % ;
- G_a - debitul aerului de uscare, în kg/s ;
- $h(x,s)$ - transformata Laplace a funcției $T(x, \tau)$;
- $H(x,s)$ - transformata Laplace a funcției (x, τ) ;
- i - densitatea fluxului de umiditate, în $kg.m^2/s$;
- k - coeficient de uscare, în s^{-1} ;
- \mathcal{L} - operatorul de transformare, Laplace ;
- l_v - căldura latentă masică de vaporizare, în J/kg ;
- λ - conductivitatea termică , $W/m.K$
- m - viteza de uscare, în %/s ;
- r - raza variabilă a unui grăunte (presupus sferic), în m ;
- R - raza echivalentă a unui grăunte, în m ;
- ρ_a - masa volumică a aerului, în kg/m^3 ;
- ρ_o - masa volumică a unui bob uscat, în kg/m^3 ;
- ρ_m - masa volumică a unui bob umed, în kg/m^3 ;
- ρ_v - masa volumică a vaporilor de apă, kg/m^3 ;

- s - variabila operațională ;
S - aria bazei stratului, în m^2 ;
 ∇ - coeficient de transfer de masă la suprafața grăuntelui, în $kg/m^2.h$;
 τ - timpul, în s ;
 $T(x, \tau)$ - temperatura semințelor, în K ;
 $\theta(x, \tau)$ - temperatura aerului, în K ;
U - umiditatea medie a semințelor, în % ;
 v_a - viteza aerului în stratul de semințe, în m/s ;
 v_m - volumul unui bob, în m^3 ;
W - umiditatea semințelor, în % ;
x - înălțimea variabilă a stratului, în m ;
X - umiditatea absolută a aerului, în kg apă/kg aer uscat ;
 Δ - operatorul Laplace de diferențiere ;

Indici

- e - echilibru
o - inițial
f - final

C U P R I N S U L

	Pag.
LISTA DE SIMBOLURI	1
PREFATA	3
1. INTRODUCERE	7
2. STADIUL ACTUAL AL CERCETARILOR PRIVIND SCHIMBUL DE CALDURA SI DE UMIDITATE LA USCAREA SEMINTE- LOR	13
2.1. Considerații asupra cineticii uscării....	13
2.2. Distribuția umidității și temperaturii în semințele supuse uscării	18
2.3. Repartizarea umidității în stratul dens de semințe supuse uscării	23
2.4. Repartizarea temperaturii în stratul dens de semințe supuse uscării	26
2.5. Variația temperaturii și umidității agentului de uscare prin stratul de se- mințe	32
2.6. Metode și instalații experimentale utili- zate la cercetarea uscării semințelor ...	36
3. STUDIU TEORETIC PRIVIND REPARTIZAREA TEMPERA- TURII INTR-UN STRAT DENS DE SEMINTE SUPUSE USCĂRII CU AER CALD	47
3.1. Punerea problemei	47
3.2. Ecuația care descrie temperatura aerului.	49
3.3. Ecuația care descrie temperatura semin- țelor	51
3.4. Rezolvarea analitică	52

	Pag.
4. INSTALATIE EXPERIMENTALA SI METODA UTILIZATA LA CERCETAREA REPARTIZARII TEMPERATURII SI UMIDITATII INTR-UN STRAT DENS DE SEMINTE SUFUSE USCARII	69
4.1. Descrierea instalației	69
4.2. Metoda de lucru.....	80
5. VERIFICARI EXPERIMENTALE SI ANALIZA REZULTATELOR	82
5.1. Legătura dintre studiul teoretic și rezultatele experimentale	83
5.2. Influența umidității relative a aerului asupra variației temperaturii semințelor	88
5.3. Influența debitului de aer asupra variației temperaturii semințelor	89
5.4. Influența temperaturii aerului asupra variației temperaturii semințelor	90
5.5. Exemplu de calcul	92
6. C O N C L U Z I I	103
6.1. Considerații finale	103
6.2. Contribuții personale	106
7. B I B L I O G R A F I E	107
8. A N E X E	113

P R E F A T A

Preocupările intense care există în prezent pe plan mondial de a se construi instalații de uscat semințe, sînt justificate prin necesitatea de a reduce umiditatea semințelor după recoltare la cca 13-14 % numită umiditate de condiționare, care să ofere posibilitatea depozitării și conservării semințelor.

Construirea, dar mai ales exploatarea instalațiilor de uscat semințe, necesită cunoașterea amănunțită a fenomenelor ce se produc în masa de semințe supuse uscării.

Fenomenele care guvernează procesele de uscare a semințelor sînt complexe, fapt ce a făcut ca studierea lor să constituie bariere greu de trecut.

Numeroși autori au făcut studii și cercetări asupra uscării semințelor dar în condiții care uneori sînt mult departe de condițiile existente în instalațiile de uscat.

După o analiză atentă a literaturii de specialitate mi-am propus să aduc unele contribuții la cunoașterea fenomenelor de uscare, printr-un studiu teoretic și experimental asupra repartizării temperaturii într-un strat dens de semințe supuse uscării convective cu aer cald.

Lucrarea de față este prima lucrare de acest gen din țara noastră și alături de alte lucrări din domeniul mecanicii agricole se înscrie pe linia perfecționării și modernizării utilajelor necesare agriculturii.

Tinînd seama de scopul urmărit, lucrarea de față are următoarea structură :

În capitolul 1 - Introducere - se prezintă conceptul uscării, se definește regimul de uscare, arătînd limitele în

care trebuie să fie cuprinși parametrii acestuia. Se arată pe scurt câteva din aspectele negative ale unui regim de uscare necorespunzător. Urmează o justificare a studiului experimental a fenomenelor de uscare. În final sînt prezentate aspectele care urmează să fie abordate.

În capitolul 2, se prezintă stadiul actual al cercetărilor privind schimbul de căldură și de umiditate la uscarea semințelor. După o explicație amănunțită a cineticii uscării, se prezintă rezultatele obținute de alți cercetători în privința studierii variației umidității și temperaturii semințelor supuse uscării într-un strat subțire sau într-un strat adînc. Urmează o prezentare sumară a celor mai reprezentative instalații experimentale de uscat semințe, precum și a metodelor de lucru utilizate. Capitolul se încheie cu aprecieri critice asupra stadiului actual al cercetărilor privind schimbul de căldură și de umiditate la uscarea semințelor.

Capitolul 3, cuprinde studiul teoretic privind repartizarea temperaturii într-un strat dens de semințe supuse uscării cu aer cald. Se prezintă ipotezele simplificatoare care au stat la baza acestui studiu, după care urmează deducerea ecuațiilor care descriu temperatura semințelor și temperatura aerului. Se procedează apoi la rezolvarea sistemului de ecuații cu derivate parțiale prin metoda calculului operațional, obținîndu-se legea teoretică de repartizare a temperaturii în raport cu timpul, de-a lîngul stratului de semințe supuse uscării.

Capitolul 4, descrie amănunțit instalația experimentală, aparatura folosită, cît și metoda de lucru.

Capitolul 5, cuprinde verificările experimentale și analiza rezultatelor uscării unui strat adînc de 0,3 m la opt

regimuri de uscare diferite și a unui strat de 0,15 m la aceleși regimuri de uscare. Se verifică în ce măsură rezultatele experimentale concordă cu studiul teoretic dezvoltat. Se studiază influența anumitor mărimi fizice asupra curbei de temperatură. La sfârșitul capitolului se dă un exemplu numeric de determinare teoretică a temperaturii semințelor la un anumit nivel în strat și după un anumit timp de uscare.

În capitolul 6 sînt prezentate considerațiile finale asupra lucrării de față, contribuțiile personale ale autorului precum și posibilitățile de aplicare ale cercetării.

Lucrarea este precedată de lista de simboluri, se încheie cu anexe privind datele măsurătorilor și bibliografia.

La numerotarea capitolelor s-a folosit sistemul zecimal. Numerotarea figurilor, tabelelor și formulelor începe cu fiecare capitol de la unu. Numerele trecute în paranteza rotundă se referă la o ecuație, iar parantezele drepte la bibliografia de la sfârșitul lucrării.

Înainte de a încheia această prezentare, consider de datoria mea să prezint mulțumirile mele tuturor acelor care m-au ajutat la elaborarea și prezentarea lucrării de față.

Mulțumirile mele se îndreaptă în primul rînd către eminentul dascăl - profesorul emerit Bănărescu Marin pentru prețioasele îndrumări și indicații date pe tot parcursul desfășurării cercetării și întocmirii lucrării.

De asemenea mulțumesc tov. profesor emerit dr. docent Ioan Vlădea, șeful catedrei de termotehnică pentru permisiunea de a folosi aparatura necesară cercetărilor experimentale.

Mulțumesc în aceeași măsură tov. prof. dr. Octav Gheorghiu și tov. prof. dr. Barbu Virgil a căror prețioase

indicații m-au călăuzit spre elaborarea studiului teoretic și a cercetărilor experimentale.

În încheiere, mulțumesc conducerii Institutului agronomic Timișoara, precum și întregului personal al catedrei de mecanizare condus de tov. conf. Lepși Simion, pentru sprijinul acordat în realizarea instalației experimentale și efectuarea experiențelor.

1. I N T R O D U C E R E

Procesul uscării materialelor este condiționat de fenomenele coloidale și termice, în care forma legăturii dintre umiditate și material joacă un rol hotărâtor în ce privește modul cum se desfășoară. De aceea cunoașterea mecanismului uscării și a naturii sale moleculare, este necesar pentru găsirea regimului optim de uscare întemeiat pe considerente științifice.

Principiile fundamentale ale procesului de uscare au fost formulate prima dată de KOSSOVICI (1904), căruia i-a urmat LEWIS (1921) și SHERWOOD (1929).

O importanță fundamentală și hotărâtoare pentru mecanismul uscării o constituie natura legăturii dintre umiditate și material, care a fost definită de acad. P.A. Rebinder căpătînd o riguroasă motivare științifică [38] .

În mod cu totul general prin uscare se înțelege extragerea apei dintr-un produs oarecare cu scopul de a obține un produs uscat, capabil de a fi păstrat prin depozitare. La uscarea artificială cu aer cald a semințelor, aceasta înseamnă trecerea apei din produs în stare de vapori și îndepărtarea amestecului vapori-aer care se formează.

Prima dintre aceste stări se realizează cu aport de căldură, care la uscătoarele folosite în general în agricultură se obține mai ales prin trecerea căldurii de la aerul de uscare la produsul de uscat.

Procesul de uscare a semințelor este caracterizat prin regimul de uscare care cuprinde următorii factori : [38]

- temperatura agentului de uscare ;
- umiditatea relativă a agentului de uscare ;

- viteza de circulație a agentului de uscare.

Ridicarea temperaturii agentului la uscarea cu aer cald, are în primul rând scopul de a ridica capacitatea de absorbție a aerului pentru apă. Pentru aprecierea acestei capacități trebuie ținut seama nu numai de temperatura și umiditatea relativă a aerului, ci și de faptul că odată cu absorbția umidității, aerul se răcește și nu poate să-și mai păstreze întreg gradientul de concentrație.

Temperatura agentului de uscare depinde de temperatura admisibilă de încălzire a semințelor. Temperatura de încălzire a semințelor depinde de umiditatea lor inițială, de timpul de menținere în stare încălzită și de felul semințelor. Cercetările efectuate [4, 25, 43, 61, 63] recomandă ca temperatura de încălzire a semințelor să fie de 30-60°C. Valorile inferioare ale temperaturii corespund pentru valori mari ale umidității semințelor și ale timpului de încălzire, iar valori superioare se folosesc pentru semințe cu umiditate mică încălzite un timp mai scurt. De asemenea valorile inferioare se utilizează la uscarea materialului de sămânță, iar cele superioare pentru material de consum. Pentru cerealele păioase temperatura agentului de uscare este cuprinsă între 60-80°C în cazul materialului pentru sămânță și de 100-150°C în cazul materialului pentru consum. Pentru porumb, orez și leguminoase temperatura agentului de uscare este de 50-70°C, în cazul materialului pentru sămânță și de 80-100°C în cazul materialului de consum.

La o acțiune continuă a agentului de uscare asupra stratului de cereale, temperatura acestuia va fi apropiată ca mărime sau cu cca 10-20°C mai mică decât temperatura de încălzire a semințelor admisă în timpul în care acestea vor fi uscate pînă la umiditatea de condiționare.

La o acțiune periodică a agentului de uscare, cu intervale de acțiune asupra materialului scurte, temperatura acestuia poate depăși la începutul procesului temperatura admisă a materialului cu cca 40-45°C.

Procesul de uscare va fi cu atât mai eficace, cu cât temperatura de uscare va fi mai mare, însă nu trebuie depășite anumite valori maxime, pentru a nu diminua însușirile de panificație și puterea de germinație.

Graficul din fig. 1.1 ne arată curbele de echilibru și domeniile în care bobul de grâu nu intră în fermentație și în modul acesta i se poate conserva puterea de germinație [40].

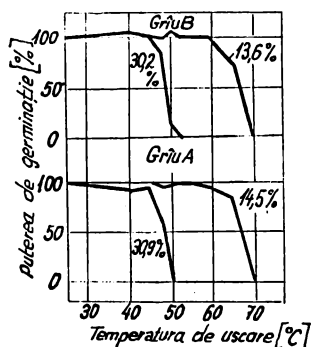


Fig. 1.1 Curbele de echilibru și domeniile în care bobul de grâu nu intră în fermentație

tură de cca 65°C fără ca să scadă puterea de germinație.

× Stabilirea temperaturii și duratei optime de uscare reprezintă factorii de bază care determină calitatea uscării în vederea păstrării pe durată lungă a semințelor.

Experiențele făcute [40] au arătat că există o dependență între temperatura limită admisă de încălzire, umiditatea cerealelor și durata de uscare (tabelul 1.1).

În cazul umidității mari - de 30,2 sau 30,9 % - temperatura de încălzire nu trebuie să depășească cca 45°C pentru ca puterea de germinație să se păstreze la valoarea maximă.

La umidități mici - de 13,6 sau 14,5 % - boabele de grâu pot fi încălzite până la o tempera-

Tabelul 1.1

Umiditatea cerealelor, (%)	Indicativul	Rezultatele obținute								
Durata de uscare, (minute)		20	50	53	60	65	70	75	80	-
11/60	T	20	50	53	60	65	70	75	80	-
	E	92	-	90	92	48	-	-	-	-
	P	96	-	98	95	91	85	-	-	-
30/60	T	20	40	42	43	45	48	50	55	60
	E	98	98	-	100	98	41	18	-	-
	P	98	99	-	100	99	88	90	-	-

T - temperatura de uscare, (°C)

E - puterea de creștere, (%)

P - puterea de germinație, (%)

În figura 1.2, se prezintă corelația dintre temperatura agentului de uscare și durata uscării, pentru diferite semințe.

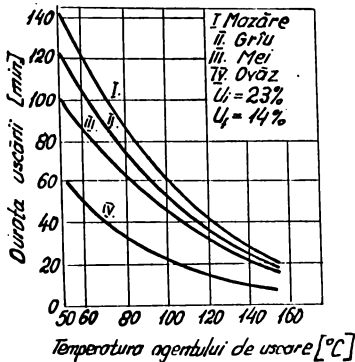


Fig. 1.2 Corelația dintre temperatura agentului de uscare și durata uscării pentru diferite semințe

Se poate constata că la o temperatură de cca 50°C durata de uscare variază pentru fiecare soi de sămânță de la 60-140 minute, cel mai mic timp de uscare necesitându-l ovăzul, iar cel mai mare boabele de mazăre. Deoarece intervalul de umiditate este același

pentru toate semințele - de la 23 % la 14 % - durata de uscare diferită este explicată prin caracteristicile și proprietățile diferite ale acestora.

Rezultatele experimentărilor lui SPRENGER [65] redate în tabelul 1.2, arată că limitele temperaturilor de încălzire a semințelor se deplasează, la cereale, în direcția temperaturilor mai joase, cu atât mai mult cu cât conținutul

inițial de umiditate al produsului a fost mai ridicat.

Tabelul 1.2

Umiditatea inițială, %	Cereale de consum			Cereale de sămîn- ță, orz pentru bere, °C
	Grâu, °C	Secară, ovăz, °C	Porumb, °C	
16	55	65	75	49
20	43	53	58	38
24	35	40	44	30

In general, temperaturile agentului de uscare ce se utilizează pentru semințele de porumb care la recoltare au umidități cuprinse între 18 și 36 %, este de 35 - 45°C.

Umiditatea relativă a agentului de uscare depinde de umiditatea inițială a semințelor și de viteza cu care dorim să efectuăm uscarea [19, 31] .

Viteza de circulație a agentului are influență asupra vitezei de uscare a semințelor [46, 61] . Valorile uzuale ale ^{vitezei} agentului de uscare sînt între 0,05 - 0,5 m/s [17] .

Studiul cineticii și dinamicii uscării într-o instalație industrială este aproape imposibil, dată fiind complexitatea procesului însuși și de aceea cercetarea influenței diferiților factori asupra procesului uscării trebuie făcută într-o instalație de laborator cu probe mici de material. Rezultatele obținute trebuie să fie traduse în condițiile uscării în producție, pentru ca să poată fi folosite la construirea uscătoarelor.

Construcția unei instalații experimentale de uscare, precum și metoda de efectuare a experienței trebuie să reflecte condițiile de uscare a materialului în producție. In acest scop, trebuie să se facă studii suplimentare asupra procesului uscării în condiții apropiate de condițiile uscării in-

dustriale, cu material de dimensiuni normale și să se aplice niște coeficienți de corecție datelor experimentale obținute pe baza experiențelor de laborator. Așadar, întregul studiu al procesului uscării unui material se împarte în două serii de experiențe : experiențe de laborator și experiențe semi-industriale.

Deoarece în procesul de uscare a unui strat dens de semințe, modul de repartizare a temperaturii de-a lungul stratului nu a fost studiat în detaliu, am intenționat să tratez în lucrarea de față următoarele aspecte :

- efectuarea unui studiu teoretic al repartizării temperaturii în raport cu timpul de-a lungul unui strat dens de semințe prin care se suflă aer cald ;
- construirea unei instalații experimentale pentru cercetarea fenomenelor de transfer de căldură și de umiditate ce apar în procesul de uscare ;
- măsurarea temperaturii și umidității semințelor la diferite nivele în stratul adânc ;
- verificarea experimentală a legii de repartizare a temperaturii stabilite teoretic ;
- studierea influenței diferiților factori asupra curbei de temperatură.

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND SCHIMBUL DE CALDURA SI DE UMIDITATE LA USCAREA SEMINTELOR

2.1. Considerații asupra cineticii uscării

În urma interacțiunii agentului de uscare cu materialul, o parte din umiditatea din material, trece în agentul de uscare sau din contră este absorbită de acesta, acest lucru depinzând de cantitatea de apă pe care o conține materialul la început. După ce a trecut un anumit timp, se stabilește un echilibru între conținutul de umiditate al materialului și umiditatea relativă a agentului de uscare. Variind succesiv umiditatea relativă a agentului de uscare din jurul materialului, se obține relația dintre umiditatea relativă a agentului de uscare și conținutul de umiditate al materialului sub forma unei curbe numită curba umidității de echilibru (fig. 2.1). În tabelul 2.1, sînt date valorile umidității de echilibru pentru diferite valori ale umidității relative a agentului de uscare pentru cîteva materiale [17] .

Particularitățile procesului de uscare a materialelor umede se caracterizează prin curbele de uscare și prin curbele vitezei de uscare [7, 38] . Curba de uscare este relația grafică dintre umiditatea materialului și timp (fig.2.2).

Curba de uscare nu caracterizează complet procesul de uscare din punct de vedere al cineticii lui. De aceea, pentru analiza modului în care se desfășoară procesul uscării se introduce curba vitezei de uscare, care se obține din curbele de uscare prin diferențiere grafică (fig. 2.3).

Tabelul 2.1

Felul semینٹelor	Temperatura aerului, K	Umiditatea relativă a aerului, în %										
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Grâu	266,4	-	-	-	11,3	12,8	14,1	15,6	17,0	-	-	-
"	273	-	-	-	11,0	12,2	13,5	14,7	16,2	-	-	-
"	283	-	-	-	10,2	11,7	13,1	14,4	16,0	-	-	-
"	298	4,3	7,2	8,6	9,7	10,9	11,9	13,6	15,7	19,7	25,6	-
"	323	4,0	5,8	6,7	8,1	10,0	10,8	12,6	15,1	19,4	-	-
Secară	298	5,2	7,6	8,7	9,9	10,9	12,2	13,5	15,7	20,6	26,7	-
Orz	298	4,4	7,0	8,5	9,7	10,8	12,1	13,5	15,8	19,7	26,8	-
Ovăz	298	4,1	6,6	8,1	9,1	10,3	11,8	13,0	14,9	18,5	24,1	-
Orez	298	5,9	8,0	9,5	10,9	12,2	13,3	14,1	15,2	19,1	-	-
Porumb	266,4	-	-	-	10,4	11,8	13,3	15,0	16,6	-	-	-
"	283	-	-	-	9,2	10,7	12,1	13,6	15,5	-	-	-
"	298	5,1	7,0	8,4	9,8	11,2	12,9	14,0	15,6	19,6	23,8	-
"	323	3,6	5,5	6,7	8,0	9,2	10,4	12,0	13,6	16,1	-	-

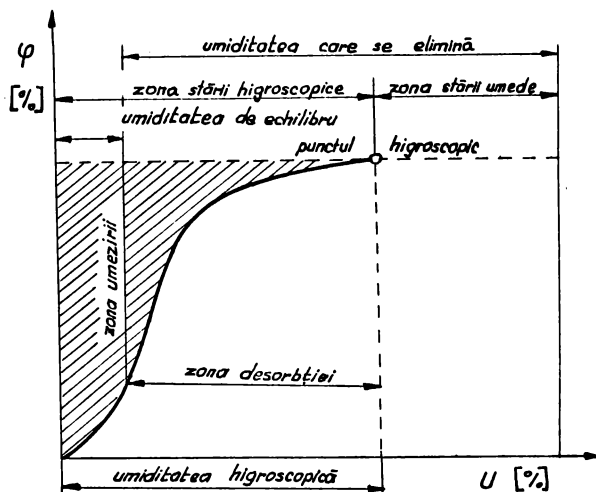


Fig. 2.1. Curba umidității de echilibru

Cercetările asupra uscării au evidențiat că atunci când un material este foarte umed procesul de uscare poate fi împărțit în două perioade distincte: [3, 4, 7, 16, 28, 33, 35, 36, 38, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 62, 64] ,

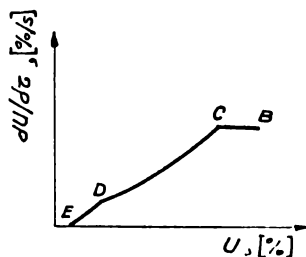
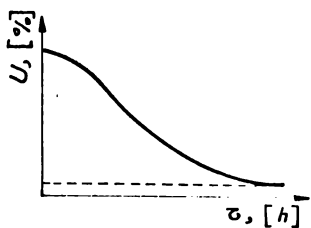


Fig. 2.2. Curba de uscare Fig. 2.3. Curba vit. de uscare

a - perioada cu viteză de uscare constantă (porțiunea BC) ;
b - perioada cu viteză de uscare descrescândă (porțiunea CDE).

Numeroși autori [1, 4, 7, 16, 33, 43, 49, 62, 64] consideră că procesul de uscare al materialelor higroscopice (așa cum sînt și semințele), se desfășoară în perioada cu viteză descrescătoare. Se utilizează, [7] ca porțiunea CD

să se numească perioada de ordinul întâi, iar porțiunea DE perioada de ordinul doi. Punctul C este numit conținut de umiditate critic (primul punct critic), iar punctul D, al doilea punct critic.

Procesul de uscare a materialelor umede constă din procesele de deplasare a umidității în interiorul materialului, din formarea vaporilor și din deplasarea umidității de pe suprafața materialului în mediul înconjurător. La contactul materialului umed cu agentul de uscare încălzit, umiditatea de pe suprafață se evaporă și părăsește materialul trecând în mediul înconjurător. Această evaporare a umidității de pe suprafață dă naștere la o scădere a umidității în straturile consecutive ceea ce provoacă o deplasare a umidității din straturile interioare spre suprafață.

Prin urmare, modul în care se desfășoară procesul de uscare este determinat de mecanismul deplasării umidității în interiorul materialului, de energetica evaporării și de mecanismul deplasării umidității de pe suprafața materialului în mediul înconjurător prin așa-numitul strat limită.

Dacă în interiorul unui material umed există un gradient de umiditate și un gradient de temperatură, umiditatea se va deplasa atât în virtutea gradientului de temperatură cât și a gradientului de umiditate. Densitatea fluxului total de umiditate este dat de relația : [38, 39] .

$$i = -D \cdot \rho_m \cdot \left(-\frac{\partial W}{\partial r} + \delta \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

Această relație este similară conductibilității termice și pentru un volum infinit mic, conduce la o ecuație diferențială care stabilește legătura dintre umiditate, temperatură și coordonate. Aceasta are forma :

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D \cdot (\nabla^2 W + \delta \cdot \nabla^2 T) \quad (2.2)$$

Pentru a rezolva această ecuație trebuie să se țină seama de căldura transportată de umezeală și îndepărtată.

Deci ecuației (2.2) trebuie să-i asociem ecuația :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{l_v}{c_m} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \quad (2.3)$$

Ecuația (2.3), este ecuația căldurii scrisă pentru un mediu omogen, izotrop și unidimensional cu izvoare de căldură (izvoare produse de căldura necesară producerii vaporilor).

Se obține deci sistemul format din ecuația (2.2) și (2.3), care guvernează schimbul de căldură și de umiditate într-un material umed supus uscării.

Folosind acest sistem se ajunge la metoda cea mai sigură de studiere a mecanismului deplasării umidității în interiorul unui material, prin analizarea câmpului nestaționar de temperatură [6, 38, 39]. Se vor obține astfel două câmpuri - cel al umidității și cel al temperaturii - fiecare în funcție de timp și coordonate. Din câmpul de umiditate se poate găsi umiditatea medie pe volum folosind relația

$$U = \frac{1}{R} \cdot \int_0^R W \cdot dz \quad (2.4)$$

Umiditatea medie pe volum va fi o funcție numai de timp, deci prin reprezentarea grafică se va găsi curba de uscare $U = f(\tau)$. Apoi prin diferențiere grafică, se va găsi curba vitezei de uscare $\frac{dU}{d\tau} = f(\tau)$.

Sistemul format din ecuațiile (2.2) și (2.3) a fost rezolvat teoretic [6, 39] în anumite condiții de unicitate, care însă nu pot fi asimilate la uscarea semințelor.

2.2. Distribuția umidității și temperaturii în
semințele supuse uscării într-un strat
subțire

Mulți cercetători [1, 4, 5, 7, 8, 14, 19, 22, 24, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 41, 45, 55, 60, 62], au arătat că atunci când semințele sînt expuse într-un strat subțire (gros de o sămîntă), ele se usucă potrivit relației :

$$\frac{U - U_0}{U_0 - U_e} = \xi \cdot e^{-k \cdot \sigma} \quad (2.5)$$

în care ξ este o constantă care în multe cazuri este egală cu unitatea.

HUSTRULID și FLIKKE [28], lucrînd cu porumb și presupunînd că bobul reprezintă o sferă cu raza R de material omogen, a dedus din matematica difuziei că :

$$\frac{U - U_0}{U_0 - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-n^2 \cdot k \cdot \sigma} \quad (2.6)$$

unde k este dat de relația : $k = \frac{D \cdot \pi^2}{R}$

Se folosește astfel presupunerea că mecanismul deplasării a umidității este cel al difuziei, dat de ecuația:

$$\frac{\partial W}{\partial \sigma} = D \cdot \nabla^2 W \quad (2.7)$$

PABIS și HENDERSON [45], au considerat boabele de porumb ca o prismă cu dimensiunile 2L, 2M, 2N și din ecuația tridimensională a difuziei au găsit relația

$$\frac{W - W_0}{W_0 - W_e} = \frac{64}{\pi^3} \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{p+m+n}}{(2p+1) \cdot (2m+1) \cdot (2n+1)} \cdot$$

în care

$$\mathcal{L}_{p,m,n} = \frac{\pi^2 \cdot D}{4} \cdot \left[\frac{(2p+1)^2}{N^2} + \frac{(2m+1)^2}{M^2} + \frac{(2n+1)^2}{L^2} \right] \quad (2.9)$$

Conținutul de umiditate mediu liber în bob la timpul τ și în limitele :

$$- N \leq x \leq N$$

$$- M \leq y \leq M$$

$$- L \leq z \leq L$$

poate fi găsit prin același procedeu ca cel aplicat în ecuația 2.4 și se exprimă astfel :

$$\frac{U - U_0}{U_0 - U_e} = \frac{512}{\pi^6} \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_{p,m,n} \cdot e^{-\tau \cdot \mathcal{L}_{p,m,n}} \quad (2.10)$$

unde

$$\beta_{p,m,n} = \frac{1}{(2p+1)^2 \cdot (2m+1)^2 \cdot (2n+1)^2}$$

Ecuatia (2.10) este adevărată pentru un coeficient de difuzie constant. Dacă însă D este o funcție de timp atunci ecuația difuziei are forma :

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D(\tau) \cdot \nabla^2 W \quad (2.11)$$

care dă umiditatea medie în bob la timpul τ sub forma :

$$\frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{512}{\pi^6} \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_{p,m,n} \cdot e^{\varepsilon} \cdot \mu_{p,m,n} \quad (2.12)$$

$$\text{unde} \quad \varepsilon = \int_0^{\tau} D(\tau) \cdot d\tau$$

iar

$$\mu_{p,m,n} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \left[\frac{(2p+1)^2}{N^2} + \frac{(2m+1)^2}{M^2} + \frac{(2n+1)^2}{L^2} \right] \quad (2.13)$$

În figura 2.4, se prezintă curbele teoretice date de ecuația 10 (linie întreruptă) și de ecuația 11 (linie plină) precum și datele experimentale (punctele) pentru uscarea

porumbului în strat subțire.

CHIU SHU CHEN și JOHNSON [7], presupunând că deplasarea umidității prin boabe se face atât sub formă de lichid cât și sub formă de vapori (neglijând termodifuzia) au găsit că viteza de uscare a porumbului în strat subțire este dată de relația

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = D(U) \cdot \nabla^2 U + \frac{\partial D(U)}{\partial U} \cdot (\text{grad } U)^2 \quad (2.14)$$

După cum se vede coeficientul de difuzie a fost considerat dependent de umiditate.

SHU și HISTRULID [55], au folosit ecuația difuziei cu coeficient dependent de umiditate sub forma

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = D(U) \cdot \nabla^2 U \quad (2.15)$$

care pusă sub formă dimensională și rezolvată cu ajutorul unui calculator numeric prin metoda diferențelor finite, a fost aplicată la uscarea porumbului. În fig. 2.5 se vede curba de uscare calculată teoretic, precum și datele experimentale.

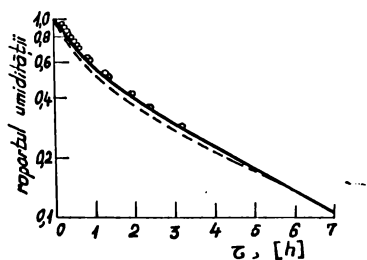


Fig. 2.4. Curba de uscare
 ———— Calculată după ec. (2.10)
 Calculată după ec. (2.12)
 după datele experimentale (punctele).

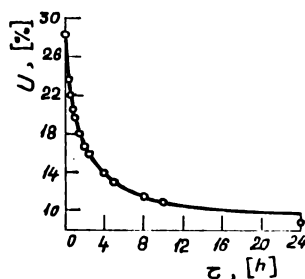


Fig. 2.5. Curba de uscare calculată teoretic și datele experimentale.

Mulți autori au efectuat experiențe de uscare a semințelor expuse în strat subțire studiind influența di-

feriților factori asupra variației umidității în funcție de timpul de uscare.

Astfel HENDERSON și PABIS [26], au făcut încercări de uscare a unui strat de semințe de grâu gros de o sămânță, a cărui umiditate inițială a fost de 51,5 %. Incercările au fost făcute la temperatura agentului de uscare de 42°C și la vitezele de 0,0204 ; 0,102 ; 0,453 și 0,685 m/s. Curbele sînt date în figura 2.6.

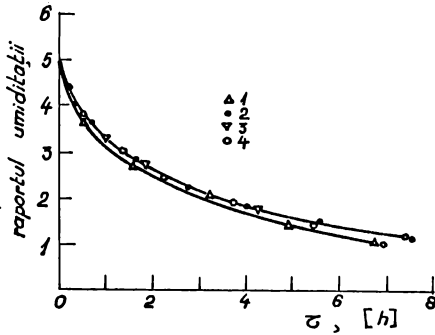


Fig. 2.6. Curbele de uscare a grâului într-un strat subțire la viteze ale aerului de :

- (1) 0,024 m/s
- (2) 0,102 m/s
- (3) 0,453 m/s
- (4) 0,085 m/s

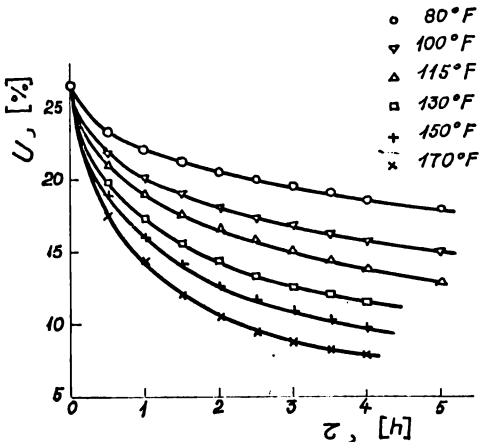


Fig. 2.7. Efectul temperaturii asupra uscării

ALLEN [1], a studiat experimental efectul temperaturii agentului de uscare asupra variației în funcție de timp a umidității semințelor de porumb care se usucă în strat subțire. Curbele experimentale sînt date în figura 2.7.

Cercetările întreprinse de ALLEN [1] au permis studierea influenței umidității agentului de uscare asupra uscării semințelor de porumb expuse în strat subțire. Curbele experimentale sînt date în figura.2.8.

În ce privește distribuția temperaturii prin semințele supuse uscării s-au efectuat diferite

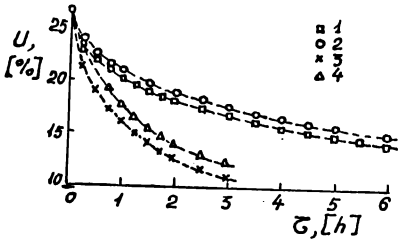


Fig. 2.8. Efectul umidității aerului asupra vitezei de uscare a porumbului [1]

Curba	Temp. aerului, °F	, %
1	100	12
2	100	43
3	150	3
4	150	33

studii [27, 31, 38, 42, 49, 50, 51, 58] care însă nu au permis o generalizare a rezultatelor dat fiind complexitatea procesului de uscare.

Cercetările teoretice și experimentale efectuate de PABIS și HENDERSON [46] și confirmate de BOYCE [4] au demonstrat că pentru scopuri practice temperatura medie a semințelor supuse uscării în-

tr-un strat subțire, poate fi exprimată de relația :

$$T = \theta + \frac{L}{p-k} (e^{-k \cdot \tau} - e^{-P \cdot \tau}) - (\theta - T_0) \cdot e^{-P \cdot \tau} \quad (2.16)$$

unde
$$P = \frac{\alpha \cdot a_m}{c_m \cdot \rho_m \cdot v_m}$$

iar
$$L = - \frac{512}{\pi^2} \cdot \frac{\rho_0 \cdot k \cdot l_v}{c_m \cdot \rho_m} \cdot (U_0 - U_e)$$

Ecuția (2.16) poate fi exprimată în termeni adimensionali de temperatură astfel :

$$\frac{T - T_0}{\theta - T_0} = 1 + \frac{L}{(\theta - T_0)(P - k)} \cdot (e^{-k \cdot \tau} - e^{-P \cdot \tau}) - e^{-P \cdot \tau} \quad (2.17)$$

Dacă se presupune că coeficientul de uscare are valoarea constantă, atunci curba de variație a temperaturii medii a unui bob este dată în figura 2.9.

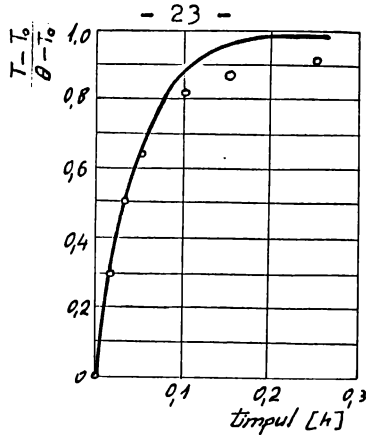


Fig. 2.9. Punctele observate și valori calculate a raportului de temperatură pentru bobul de porumb [46] .

2.3. Repartizarea umidității în stratul dens de semințe supuse uscării

Tentativele anterioare de a dezvolta metode analitice pentru generalizarea aplicării ecuației difuziei sau a unei forme a acestei la uscarea stratului adânc de semințe, au fost bazate pe presupunerea că stratul adânc poate fi considerat ca o serie de straturi subțiri [1, 4, 24, 28, 34, 41, 50, 58] . Dacă este posibil a găsi variația umidității într-un strat subțire, atunci grupe de straturi subțiri pot fi combinate pentru a forma un strat adânc.

Folosind teoria uscării stratului subțire, la uscarea straturilor adânci, ALLEN [1] , a făcut experiențe de uscare cu porumb într-un strat gros de 91,5 cm.

În figura 2.10 se prezintă curbele de uscare a dife-

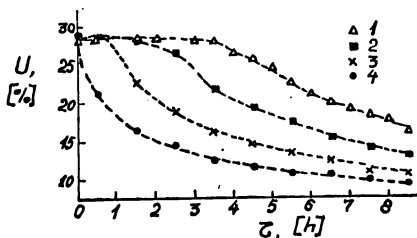


Fig. 2.10. Curbele de uscare a porumbului [1]

- (1) 91,5 cm
- (2) 61,0 cm
- (3) 30,5 cm
- (4) baza stratului

ritelor straturi (0 cm ; 30,5 cm ; 61 cm și 91,5 cm), după ALLEN [1] .

Temperatura agentului de uscare în aceste cazuri a fost de 48,8°C.

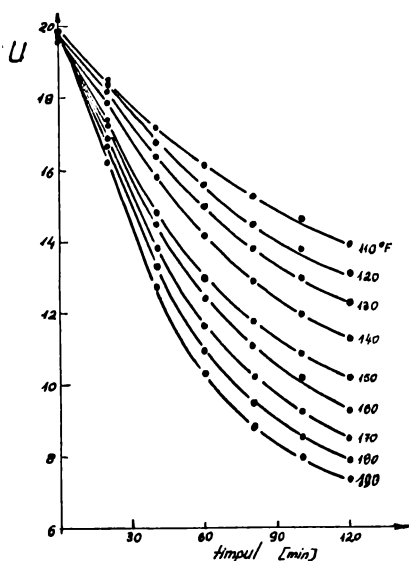


Fig. 2.11. Curbele de uscare pentru grâu la diferite temperaturi ale aerului [63] .

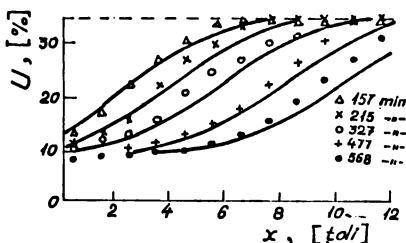


Fig. 2.12. Variația umidității orzului dispus într-un strat adânc de 305 mm : După datele experimentale (punctele) Calculate după ec. 2.6 [4] .

BOYCE [4] , a studiat variația umidității orzului dispus într-un strat adânc de 30,5 cm. Variația umidității a fost urmărită atât în timp cât și de-a lungul înălțimii stratului. Rezultatele acestor cercetări sînt arătate în figura 2.12.

WOODFORDE și LAWTON [63] făcînd încercări cu grâu așezat într-un strat gros de 152,4 mm, cu o umiditate inițială de 20 %, au obținut datele arătate în fig. 2.11, la diferite temperaturi ale agentului de uscare.

CLARK și LAMOND [10], au făcut încercări de uscare a grâului în strat adânc de 61 cm, conținutul de umiditate inițial fiind de

35 sau 45 %. S-au folosit un număr de 12 probe, fiecare fiind încercată în condiții de temperatură și debit al agentului de uscare diferite.

Rezultatele experiențelor sînt arătate în figura

2.14.

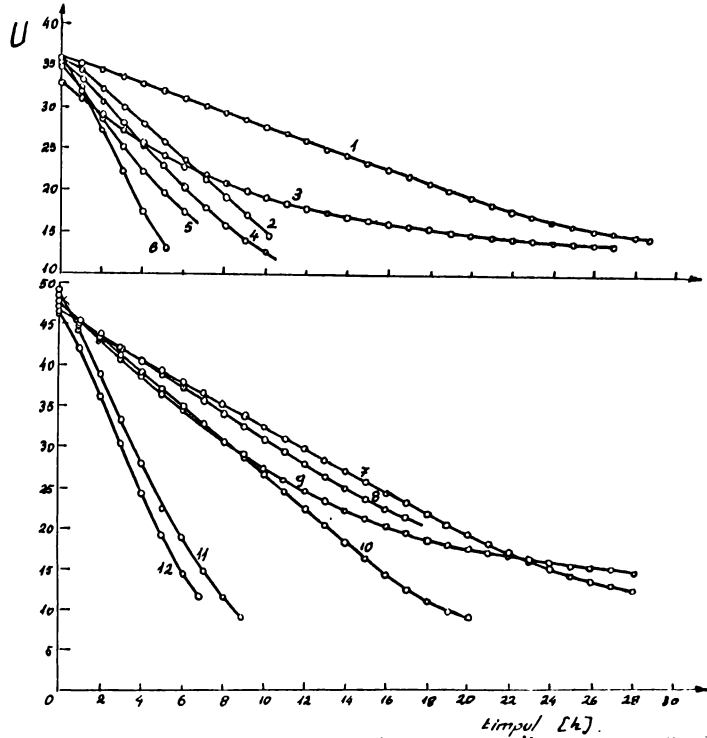


Fig. 2.14. Curbele de uscare pentru grâu [10]

WOOFORDE și OSBORNE [64], au făcut experiențe cu grâu urmărind uscarea unui strat adînc de 30,5 cm și a unui strat adînc de 61 cm. Viteza agentului de uscare, umiditatea medie a semințelor (inițială și finală) precum și timpul de uscare sînt date în tabelul 2.2. Temperatura agentului de uscare este de 30°C.

În timpul uscării nu s-a urmărit variația umidității în timp de-a lungul stratului, ci s-a urmărit pierderea (variația) în greutate a semințelor. Acest lucru se poate constata și din figura 2.15 și figura 2.16.

Tabelul 2.2

Nr. seriei	Adâncimea stratului, cm	Viteza agentului de uscare, m/s	Umiditatea medie a semințelor, %		Timpul,		Pierdere în greutate, g
			inițială	finală	h	min	
28	30,50	0,380	20,00	14,20	3	15	1474,17
5		0,316	19,80	14,20	3	30	1445,85
2		0,240	19,90	14,00	4	15	1502,52
24		0,158	20,00	13,90	5	45	1502,52
6	61,00	0,265	21,10	14,00	6	30	3114,44
7		0,209	19,80	14,00	6	50	2976,69
8		0,158	19,90	14,10	10	00	2976,69
10		0,316	20,00	14,20	5	30	3033,39

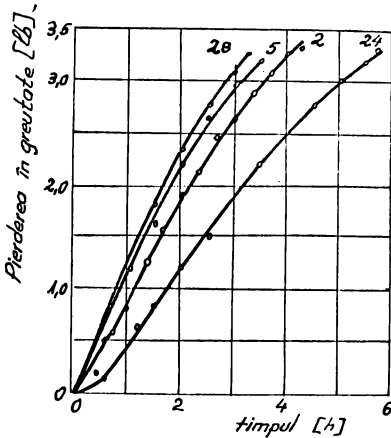


Fig. 2.15. Pierdere în greutate în timpul uscării grâului. Adâncimea stratului, 30,5 cm [64].

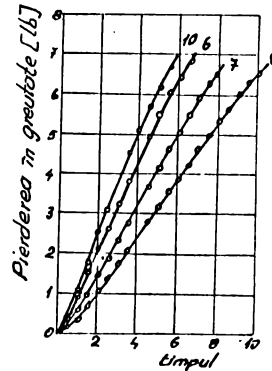


Fig. 2.16. Adâncimea stratului, 61 cm.

2.4. Repartizarea temperaturii în stratul dens de semințe supuse uscării

Literatura de specialitate indică foarte puține studii teoretice asupra variației temperaturii prin stratul de semințe umede în timpul uscării cu aer cald.

LIKOV și MIHAILOV [39] au generalizat sistemul format din ecuațiile (2.2) și (2.3) prin aplicarea lui la uscarea materialelor granulare dispuse în strat dens. Prin scrierea a

încă patru ecuații și a unor condiții de integrare legate fenomenologic între ele, se obține sistemul de ecuații cu derivate parțiale (2.19 - 2.25), prin a cărui integrare se poate determina temperatura semințelor și a agentului de uscare, precum și umiditatea semințelor și a agentului de uscare în orice timp și la orice nivel în strat.

$$\frac{\partial [x, T(x, \tau)]}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 [x, T(x, \tau)]}{\partial x^2} + \frac{l_v}{c_m} \cdot \frac{\partial [x, W(x, \tau)]}{\partial \tau} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial [x, W(x, \tau)]}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 [x, W(x, \tau)]}{\partial x^2} + D \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 [x, T(x, \tau)]}{\partial x^2} \quad (2.20)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} = l_v \cdot \sigma \cdot (1 - \epsilon) \cdot [W(R, \tau) - W_e] - \alpha \cdot [T(R, \tau) - \theta(x, \tau)] \quad (2.21)$$

$$D \cdot \rho_0 \cdot \left[\frac{\partial W(R, \tau)}{\partial x} + \delta \cdot \frac{T(R, \tau)}{\partial x} \right] = -\sigma [W(R, \tau) - W_e] \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} + v_a \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha \cdot A_1}{c_a \cdot \rho_0 \cdot \epsilon} [\theta(x, \tau) - T(R, \tau)] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \frac{W(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (2.24)$$

$$\text{la } x = 0 ; \quad \theta = \theta_0 = \text{const.} \quad (2.25)$$

$$x = v_a \cdot \tau ; \quad T = T_0 = \text{const.} ; \quad W = W_0 = \text{const.}$$

Rezolvarea analitică a sistemului, este o problemă foarte dificilă datorită atât numărului mare de variabile, precum și existenței derivatelor parțiale.

Mulți cercetători [1, 3, 4, 31, 34, 42, 46, 48, 61, 63, 64, 58], au făcut experiențe cu diferite semințe pentru a găsi modul cum se repartizează temperatura de-a lungul stratului de boabe în timpul trecerii agentului de uscare cald prin strat. Prin folosirea unor ipoteze simplificatoare ei își bazează analizele lor pe echilibru de căldură și de masă într-un strat subțire, considerînd că un

strat adînc este format dintr-un grup de straturi subțiri.

Astfel BOYCE [4] a studiat variația temperaturii orzului supus uscării cu aer cald într-un strat adînc de 30,5 cm. A fost aplicată ecuația 2.16 pentru care însă a fost necesar să se determine experimental coeficientul de uscare k și umiditatea de echilibru U_e . Variația temperaturii a fost urmărită atît în timp cît și de-a lungul stratului. Rezultatele acestor experiențe sînt arătate în fig. 2.17. Cu această

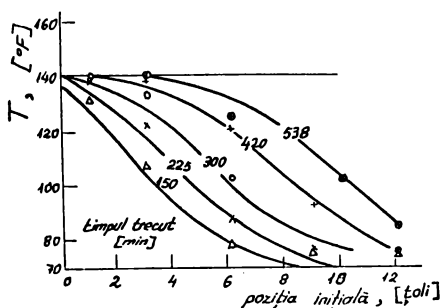


Fig. 2.17. Variația temperaturii semințelor de-a lungul stratului, după [4]

ocazie BOYCE a semnalat un fenomen interesant la uscare straturilor adînci și anume că la începutul uscării temperatura aerului în jurul masei de semințe variază rapid de la temperatura inițială a semințelor la o temperatură așa numită de "pseudosaturație".

Îndată ce a fost atinsă această temperatură zona de încălzire se mișcă îndreptată în sus și dacă uscarea este prelungită toată cantitatea de semințe se apropie de temperatura de uscare (a agentului de uscare), în timp ce conținutul de umiditate se apropie de conținutul de umiditate la echilibru.

Cercetările efectuate de ALLEN [1] arată că temperatura semințelor într-un strat de porumb gros de 91 cm se produce ca în fig. 2.18. Temperatura aerului de uscare este de $48,88^{\circ}\text{C}$ iar temperatura inițială a semințelor este de $15,2^{\circ}\text{C}$.

THOMPSON [58] utilizînd teoria stratului subțire, a realizat un model matematic privind uscarea porumbului. Din aceste cercetări a rezultat că temperatura semințelor la sfîrșitul unei anumite perioade de uscare este dată de relația 2.26.

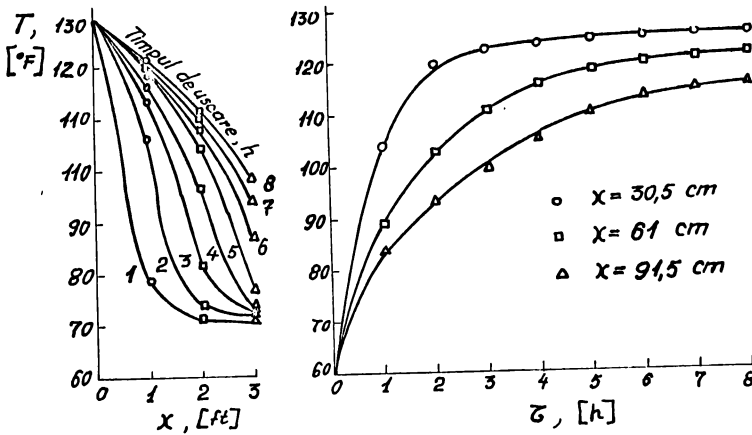


Fig. 2.18. Variația temperaturii într-un strat adânc de semințe de porumb [1]

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot X_0) \theta_e - \Delta X \cdot (\log 0,8 + \Delta l_v + 32 - T_e) + c_m \cdot T_e}{0,24 + 0,45 \cdot X_f + c_m} \quad (2.26)$$

unde $\Delta X = X_f - X_0$

$$\Delta l_v = l_{vf} - l_{v0}$$

$$T_e = \theta_e = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot X_0) \cdot \theta_0 + c_m \cdot T_0}{0,24 + 0,45 \cdot X_0 + c_m} \quad (2.27)$$

$$l_v = (\log 94 - 0,57 \cdot \theta) (1 + 4,34 \cdot e^{-28,25 \cdot U})$$

$$c_m = (0,350 + 0,00851 \cdot U) \cdot R_c$$

Pentru stabilirea relației (2.26), s-a scris bilanțul termic în unități Btu/lb aer uscat, iar raportul R_c (în lb aer/lb semințe) a fost folosit pentru a converti căldura masică a porumbului pentru aceste unități.

Cercetările lui SPENCER [57] se deosebesc fundamental de cele ale cercetătorilor citați pînă acum, deoarece stabilirea bilanțului termic se face pentru un element de volum din întregul strat de semințe, obținîndu-se ecuația 2.28

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{-\alpha \cdot [T(x, \tau) - \theta(x, \tau)] + 1_v \cdot \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} \cdot \rho_0 \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_0 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot [c_0 + c_u \cdot U(x, \tau)]} \quad (2.28)$$

care prin rezolvare prin metoda diferențelor finite cu ajutorul unui calculator numeric se obține soluția grafică ca în figura 2.19.

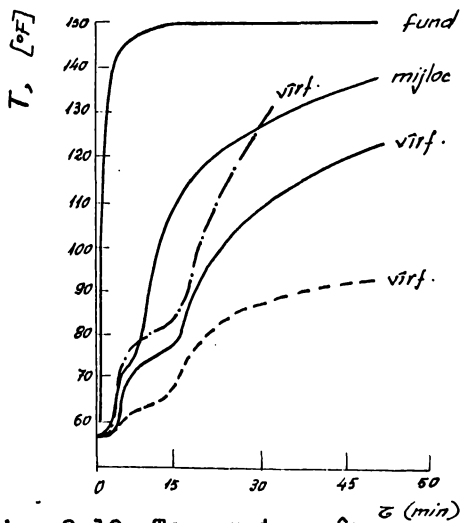


Fig. 2.19. Temperatura în stratul de semințe [57]
 - - - - 110°F
 ——— 150°F
 - . - . 190°F

WOODFORDE și LAWTON [63], făcînd încercări cu grîu și orz într-un strat adînc de 152,4 cm au obținut (pentru grîu) la diferite temperaturi ale agentului de uscare, curbele arătate în figura 2.20.

WOODFORDE și OSBORNE [64], făcînd încercări cu grîu în straturi adînci de 30,5 cm și de 61 cm, la o temperatură a agentului de uscare de 60°C au găsit

repartizarea temperaturii ca în figura 2.21.

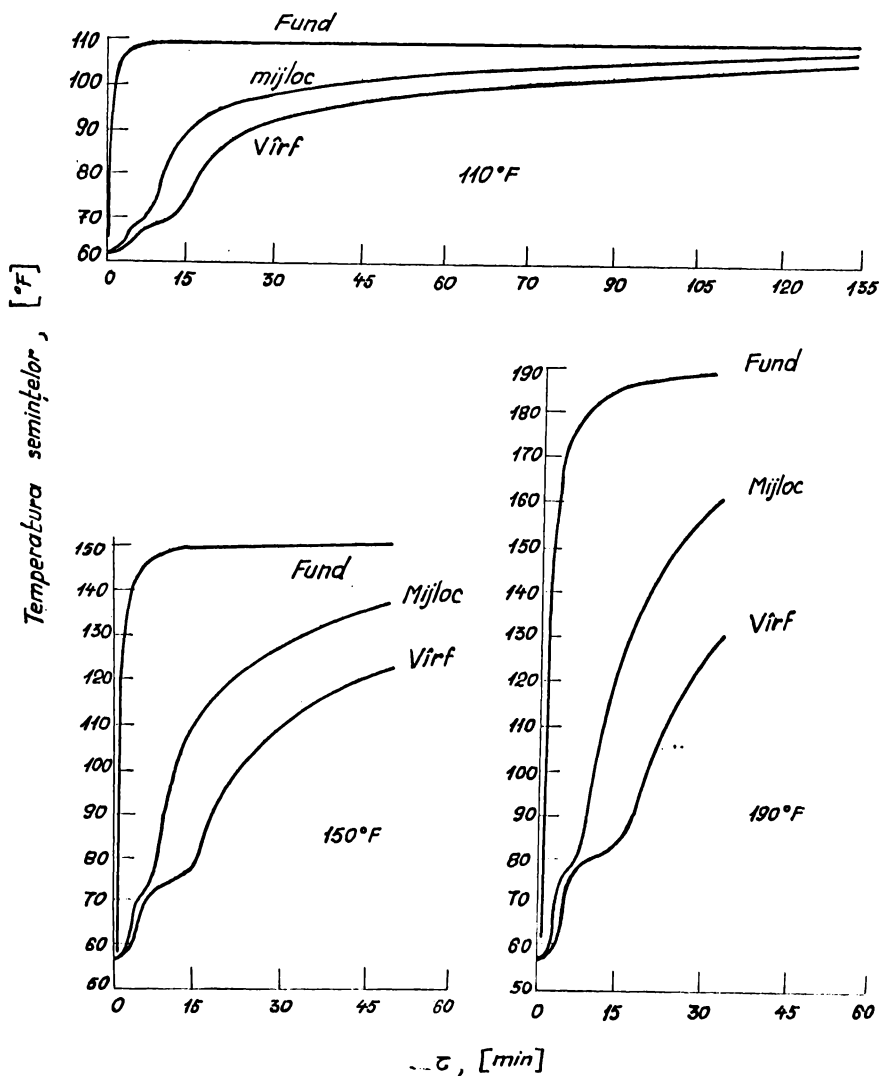


Fig. 2.20. Variația temperaturii într-un strat de grâu adînc de 152,4 mm, pentru diferite temperaturi ale aerului [63]

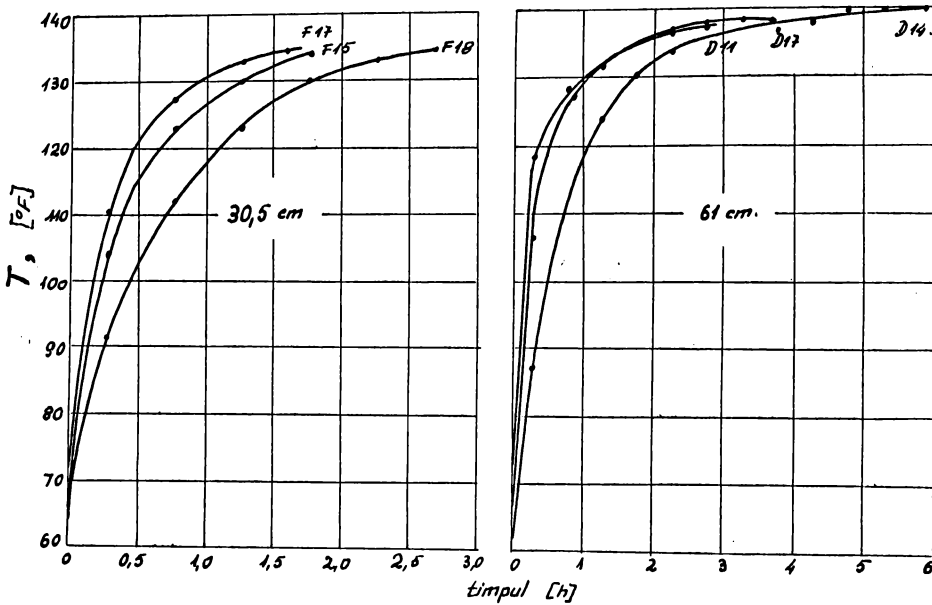


Fig. 2.21. Temperatura în semințe la 87 mm de la fundul stratului [64]

Nr. seriei	Temp. aerului	Viteza aerului, m/s	Umidit. inițială, %	Umidit. finală, %	Timp,		Pierd. greut. (g)
					h	min	
F 15	140°P	0,245	20,1	14,1	2	0	1530
F 17		0,331	20,0	14,0	1	40	1530
F 18		0,163	19,9	14,2	2	50	1446
D 11		0,326	19,8	13,8	3	0	3063
D 14		0,163	19,8	13,7	6	0	3099
D 17		0,245	20,2	14,2	3	45	3063

2.5. Variația temperaturii și umidității agentului de uscare prin stratul de semințe

WOODFORDE și LAWTON [62], în experiențele de uscare a grâului și orzului în straturi de 152,4 mm, au măsurat temperatura la termometrul umed și uscat al aerului la ieșirea din strat și pentru diferite valori ale temperaturii aerului la intrare au găsit curbele din figura 2.21. Aceste curbe sînt folosite pentru determinarea umidității relative a aerului de uscare la ieșire, prezentate în

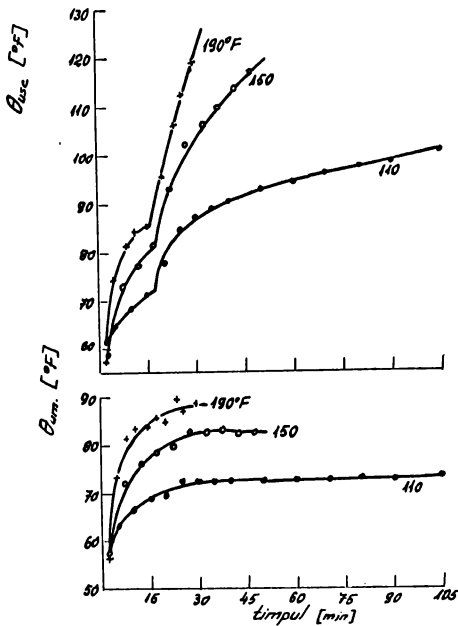


Fig. 2.22. Temperaturile la bulbul uscat (sus) și la bulbul umed (jos) al aerului de ieșire [62]

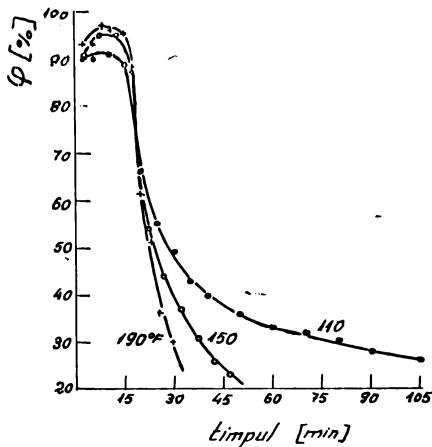


Fig. 2.23. Umiditatea relativă a aerului de ieșire la diferite temperaturi ale aerului de intrare [62]

figura 2.23.

CLARK și LAMOND [11] făcînd experiențe cu grîu într-un strat adînc de 61 cm, a găsit că pentru o temperatură inițială a agentului de uscare de $27,2^{\circ}\text{C}$ și o viteză de $0,76$ m/s, la umiditatea semințelor de 35 %, umiditatea relativă a agentului de uscare la ieșire variază conform graficului din figura 2.24.

In urma cercetărilor asupra uscării stratului dens de semințe, efectuate de SPENCER [57], acesta a găsit ecua-

ția :

$$\frac{\partial \rho_v(x, \tau)}{\partial x} = \rho_m \frac{(1 - \varepsilon)}{v_a} \cdot \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} \quad (2.29)$$

care în urma rezolvării cu ajutorul unui calculator numeric prin metoda diferențelor finite se găsește soluția grafică așa cum se arată în figura 2.25.

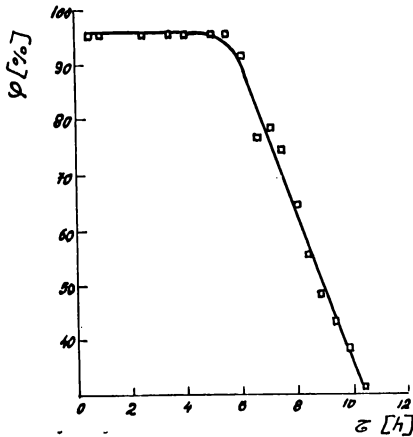


Fig. 2.24. Variația umidității relative a aerului la ieșire [1]

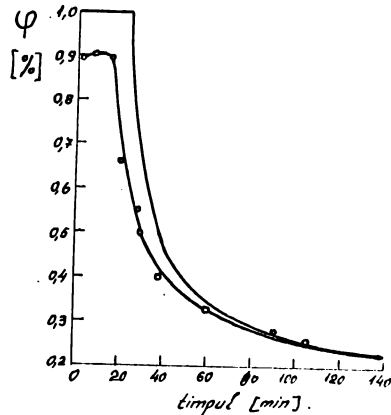


Fig. 2.25. Variația umidității agentului de uscare în raport cu timpul [57, 62]

Experiențele lui ALLEN [1] asupra uscării porumbului într-un strat adânc de 91,5 cm (fig. 2.26) au scos în evidență natura complexă a procesului de uscare precum și imposibilitatea de a preciza teoretic valoarea umidității agentului de uscare la un anumit timp și într-un anumit punct în strat. În fig. 2.26 se prezintă variația umidității relative a agentului de uscare în funcție de timp la adâncimea de 30,5 ; 61 și 91,5 cm într-un strat de porumb.

Cercetarea variației temperaturii agentului de uscare la trecerea prin stratul dens de semințe, a preocupat pe mulți autori [1, 3, 4, 11, 34, 42, 57, 48, 63, 64] . Dintre cele mai interesate este de menționat lucrarea lui ALLEN [1] referitoare la uscarea porumbului. În fig. 2.27 se

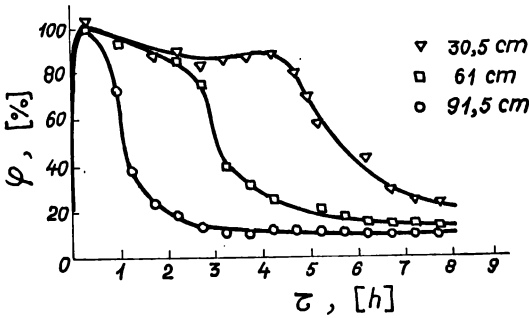


Fig. 2.26. Variația umidității aerului la trecerea prin strat, după [1]

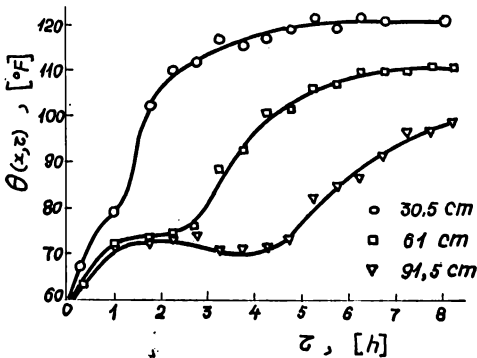


Fig. 2.27. Variația temperaturii aerului la trecerea prin strat, după [1]

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha \cdot [T(x, \tau) - \theta(x, \tau)]}{G_{\alpha} \cdot c_a} \quad (2.30)$$

Ecuția 2.30 a fost rezolvată cu ajutorul unui calculator numeric prin metoda diferențelor finite, iar soluția este reprezentată grafic în fig. 2.28 a și fig. 2.28 b. Pe grafioul din fig. 2.28 a, se poate vedea concordanța dintre ecuația 2.30 și experiențele lui WOODFORDE și LAWTON [62],

x) Mărimile din ecuația (2.30) sînt exprimate în unități engleze.

prezintă curbele experimentale de variație a temperaturii agentului de uscare în funcție de timp la adîncimea de 30,5 ; 61 și 91,5 cm într-un strat de porumb supus uscării cu aer la temperatura de 54,11°C.

SPENCER [57], în urma studiilor analitice a găsit că temperatura agentului de uscare în stratul de semințe este descrisă de ecuația (2.30) x)

iar din fig. 2.28 b, concordanța cu experiențele lui CLARK și LAMOND [11] .

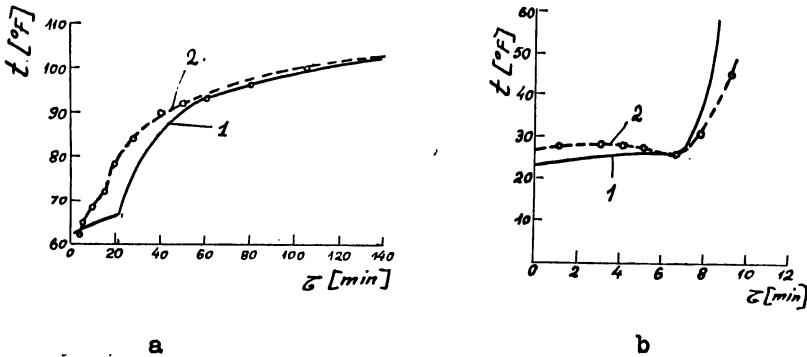


Fig. 2.28. Variația temperaturii în stratul de semințe [57]
1. Ecuația 2.30
2. Experimental

2.6. Metode și instalații experimentale utilizate la cercetarea uscării semințelor

IVES, HUNKILL și BLANK [31] , au folosit o instalație de laborator care simulează procesul de uscare în contracurent nestaționar, prin folosirea unei coloane de tăvi cu semințe stivuite. Periodic se scoate tava de la fund (pe unde intră aerul) și simultan se plasează altă tavă nouă pe vârful stivei de tăvi, imitând curgerea nestaționară a semințelor. Tăvile de uscare sînt camere toroidale de fibre de sticlă sau plută căptușită cu foaie metalică. Cavitatarea camerei care conține semințele are suprafața de 464 cm^2 și adîncimea de 5,8 cm cu fundul perforat și mici suporturi din vergele de oțel în cruce. Toate tăvile sînt echipate cu termocuple plasate în centrul fundurilor tăvilor. Diferite tăvi sînt echipate cu seturi de cîte 6 termocuple pentru a măsura variația orizontală a temperaturii. Ramele a două tăvi sînt prevăzute cu termocuple pentru a

măsura căldura de absorbție și conducție. Tăvile sînt ținute împreună în stivă cu bandă de acoperire care se pune și se scoate ușor și repede la schimbarea tăvilor. Coloana de tăvi stivuite, care variază în înălțime în funcție de condițiile de încercare de la 6 la 18 tăvi ; sînt ridicate din cameră pentru nu mai mult de 2 sau 3 secunde pentru a scoate tava de la fund.

Greutatea conținută în tava care se scoate (de jos) a putut fi adusă și menținută la o valoare la care variația (dintre tăvi) nu a fost mai mare de ± 1 g. Inregistrarea temperaturii bulbului uscat a fost menținută în cele mai multe cazuri în interiorul a $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$ de un încălzitor electric cu control termostatic și manual. Inregistrarea temperaturii punctului de rouă a fost stabilită și ținută constantă prin folosirea apei reci și a unui turn de pulverizare. Distribuirea aerului a fost măsurată de o placă de metal perforată calibrată și controlată de un regulator de intrare și valve de trecere.

Incercările preliminare au indicat că a fost posibil controlul foarte satisfăcător al condițiilor de înregistrare al aerului - temperatura, umiditatea și viteza curentului de curgere.

HENDERSON [24] , a conceput o instalație pentru uscarea orezului într-un strat adînc de 763 mm însă folosește teoria de uscare a stratului subțire.

Agentul de uscare este format din amestec de aer cu gaze de ardere care are o temperatură inițială de $43,4^{\circ}\text{C}$. Această temperatură a fost menținută aproximativ constantă, oscilații existînd doar de $\pm 0,278^{\circ}\text{C}$. Măsurarea ei s-a făcut cu termometrul cu mercur.

Măsurarea umidității agentului de uscare s-a făcut cu termometrul umed și uscat.

Debitul, deci și viteza agentului de uscare s-a măsurat cu ajutorul unei diafragme.

Camera de uscare cuprinde 5 cutii suprapuse cu fundul perforat ; alături există și recipientul pentru uscarea în strat subțire. Temperatura semințelor din camera de uscare este măsurată la suprafețele de separare între cutii, de termocuple și înregistrate cu un termograf, care înregistrează temperatura la intervale de un minut.

Conținutul mediu de umiditate pentru fiecare cutie a fost determinat din pierderea de greutate măsurată cu o balanță care dă o eroare de 0,05 g.

Pentru uscarea grîului, WOODFORDE și OSBORNE [64] au folosit instalația arătată în fig. 2.29 în care :

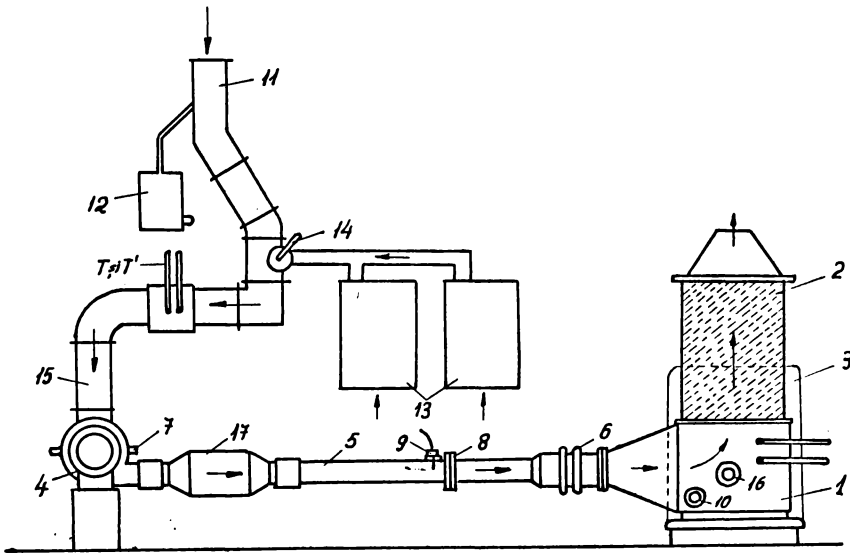


Fig. 2.29. Instalația experimentală utilizată de WOODFORDE, [64]

1. este camera de uscare ;
2. cutie de semințe demontabilă ;
3. balanță pentru cîntărire ;
4. ventilator centrifugal ;

5. tub de măsurare (conductă) ;
6. legătura elastică prevăzută cu valva de izolare ;
7. valvă de reglare a debitului ;
8. placă cu orificii ;
9. termocuplu ;
10. robinet conectat la un manometru ;
11. conducta de aspirație ;
12. umidificator de aer ;
13. uscător cu silicagel ;
14. valvă de amestecare ;
15. încălzitor de aer ;
16. termostat ;
17. încălzitor secundar de aer ;
- T. termometru cu bulb uscat ;
- T' termometru cu bulb umed.

Cutia de semințe este construită din placaj și are o secțiune transversală de $9,29 \text{ dm}^2$ adâncimea patului puțin fiind fi de 30,5 cm sau de 61 cm.

Pentru determinarea variației conținutului de umiditate mediu, se măsoară greutatea apei evaporate din materialul umed cu ajutorul balanței cu platformă care permite citirea schimbărilor în greutate mai mică de 14,4 g pe un cadru. După ce cutia s-a umplut cu semințe și uscarea a început, procesul nu a fost deranjat pînă cînd conținutul mediu de umiditate a ajuns aproape de 14 %.

La sfîrșitul fiecărei încercări s-au luat probe pentru conținutul de umiditate la patru nivele și la patru poziții simetrice în plan la aproape 50,8 mm de la marginea cutiei.

Pentru operația de cîntărire este întreruptă trecerea aerului spre camera de uscare.

Temperatura în masa de semințe a fost măsurată cu ajutorul unor termocupluri la 76,2 mm de fundul stratului urmărindu-se variația temperaturii în raport cu timpul.

Temperatura inițială a agentului de uscare a fost de

37,8 ; 49 și 60°C și menținută în jurul acestor valori cu ajutorul termostatului.

Umiditatea agentului de uscare este măsurată cu ajutorul termometrelor cu bulb umed și uscat.

Debitul specific ale agentului de uscare a fost de 0,153 - 0,382 $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ reglabil cu ajutorul unei valve în racordul de aspirație al ventilatorului. Plăcile cu orificii sînt standardizate, toleranța totală pentru măsurarea debitului este de aproximativ $\pm 2\%$ la 34 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ și $\pm 5,8\%$ la 120 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

WOODFORDE și LAWTON [63] au folosit parțial aceeași instalație pentru uscarea grîului și orzului în straturi adînci de 152,4 mm cu diferite umidități inițiale, cu diferite debite și temperaturi de intrare a aerului. Tava de semințe are dimensiunile interioare de 305 x 305 x 190 mm confecționată din foaie de Perspex, cu un capac tot de Perspex care are rolul să susțină termocuplurile (2) cu rezervorul de apă și pentru a evita evacuarea rapidă a aerului de la suprafața stratului. În timpul perioadei de uscare tava a fost transportată și replasată la intervale de 20 minute pentru cîntărire pe o balanță care permitea citirea pe o scară a variației greutății de aproximativ 20 g. Această operație a necesitat aproape 20 secunde.

Temperatura în patul de semințe a fost măsurată cu ajutorul a trei seturi de 4 termocupluri (1) plasate în semințe, (fig. 2.30) la 6,5 mm de fund și vîrf și în mijlocul patului. Termocuplurile au fost conectate la un punct multiplu la care se racordează un potențiomtru.

Temperaturile la bulbul umed și uscat a aerului de ieșire sînt măsurate la intervale regulate cu ajutorul a două termocupluri (de tipul celor folosite de WARNER și BROWNE [61]).

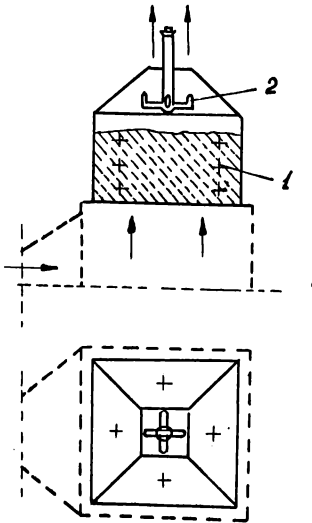


Fig. 2.30. Camera de uscarea

le imersate în stratul de semințe poate fi cu ușurință transportată pe camera de uscarea a instalației de răcire.

Temperatura și umiditatea semințelor se determină în același mod.

Temperatura aerului la intrare este măsurată la partea inferioară a tăvii cu toleranța de $\pm 1,8^{\circ}\text{C}$ între $4,45 - 15,5^{\circ}\text{C}$.

Debitul aerului se măsoară la fel, iar umiditatea aerului nu este reglată.

S-au făcut încercări și cu ajutorul instalației mici de uscarea care la camera de uscarea avea un container cu o arie de $77,4 \text{ cm}^2$. La această instalație s-a efectuat experiențe prin amestecarea manuală timp de 10 s , la intervale de 10 minute . Fiecare repriză a durat două ore și semințele au fost cântărite după fiecare 20 minute . La sfârșitul fiecărei reprize s-au luat mostre din vârful, mijlocul și fundul patului pentru a determina gradientul de umiditate,

Datele înregistrate au fost folosite și la determinarea umezeții relative a aerului la ieșire și a conținutului de umiditate.

Debitul curentului de aer a fost măsurat cu ajutorul plăcii cu orificii standardizate cu o toleranță de $\pm 3 \%$ pentru debite de $0,03 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ și 4% la $0,0076 \text{ kg/s}$.

Alături de instalația de încălzire și de alimentare s-a plasat o instalație de răcire a stratului de semințe.

Tava cu grăunțe de $305 \times 305 \text{ mm}$, completă cu termocuplurile

Debitul agentului de uscare a fost măsurat cu un debitmetru (o-25o l/min).

Temperatura aerului a fost menținută constantă cu ajutorul unui termostat.

CLARK [9] a proiectat, construit și încercat o instalație universală cu aer încălzit pentru cercetarea uscării cerealelor care are precizia aparaturii de laborator dar rezultatele au valabilitatea celor obținute cu o instalație la scară normală.

Fiecare element de uscare cuprinde o cutie (platformă) cu o capacitate de 318o kg \pm 9o g montat pe o balanță de cântărire cu o precizie la măsurarea pierderii în greutate de \pm 113 g.

În timpul încercărilor nu s-a studiat repartizarea temperaturii prin masa de semințe și doar s-a măsurat temperatura la o anumită distanță de la fundul camerei de uscare cu ajutorul unei rețele termoelectrice.

Temperatura aerului de uscare la fiecare element de uscare este măsurată de termometre speciale cu tub de mercur cu scală lungă introdusă în conductele de alimentare cu aer la 45 cm înainte de intrarea în camera de uscare. În fiecare conductă sînt folosite două termometre, unul cu bulbul uscat și unul cu bulbul umed, pentru a determina și umiditatea relativă.

Umiditatea aerului la ieșire din fiecare element de uscare este măsurată cu un higrometru de bulb umed și uscat cu o pîlnie care imprimă o viteză deasupra bulbului umed de 4,26 - 21,3 m/s.

Debitul de aer de uscare este măsurat în fiecare conductă de alimentare cu ajutorul unei plăci cu orificiu pentru debite sub 1,72 kg/s și de un tub Pitot pentru debite

KUANG și colab. [34] a folosit pentru uscarea orezului proaspăt recoltat ca agent de uscare aerul în instalația arătată în fig. 2.31 în care :

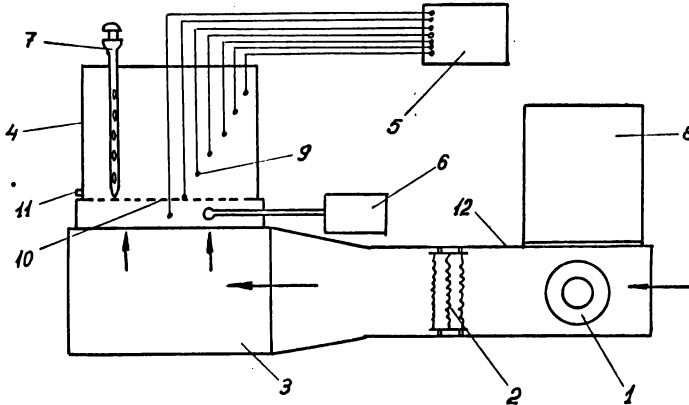


Fig. 2.31. Instalația experimentală utilizată de KUANG [34]

- 1, ventilator cu turație variabilă ;
- 2, încălzitor electric ;
- 3, cameră de amestec ;
- 4, camera de uscare ;
- 5, termometru electric ;
- 6, debitmetru ;
- 7, sondă pentru semințe ;
- 8, element care controlează și reglează temperatura aerului ;
- 9, termistoare ;
- 10, sită din sîrmă ;
- 11, orificiu de acces ;
- 12, conductă de aer.

Camera de uscare este alcătuită dintr-o cutie cilindrică cu diametrul de 406,4 mm (16 țoli) și înălțimea tot de 406,4 mm, al cărei fund este din plasă de sîrmă.

În timpul încercărilor s-au folosit adîncimi de 365,6 mm (14 țoli) și de 381 mm. Repartizarea umidității pe

Înălțimea stratului a fost studiată prin luarea de probe cu ajutorul unei sonde cu diametrul de 12,7 mm cu decupări împărțite la intervale de 10,12 mm.

La nivelele la care s-au luat probe pentru umiditate s-au plasat termistoare pentru a urmări variația temperaturii pe înălțimea stratului.

Intervalele de timp la luarea probelor de semințe pentru teste de umiditate și citirea temperaturii semințelor a fost de o oră între citiri pentru primele 6 ore, apoi la intervale de două ore pînă cînd s-a obținut umiditatea cerută (obișnuit 10-12 ore).

Temperatura aerului, viteza curentului de aer, conținutul inițial al semințelor au fost variate în experiențe. Pentru fiecare experiență a fost aleasă o valoare constantă a acestor variabile.

ALLEN [1] a folosit instalația prezentată în fig.2.32 în care :

1. este ventilator cu turație variabilă ;
2. conductă de aspirație ;
3. element de încălzire ;
4. conductă de măsurare ;
5. termoreleu ;
6. camera de uniformizare ;
7. camera de uscare ;
8. balanță pentru cîntărire ;
9. conductă de uniformizare ;
10. boiler pentru producerea aburului ;
11. camera de uscare pentru paturi adînci.

Camera de uscare are forma unei cutii prismatice cu fundul perforat cînd se fac experiențe cu semințe expuse într-un singur strat sau poate fi sub forma unei coloane al-

cătuță din trei tăvi (T) de câte 25,4 mm grosime, trei cupe (C) cu adâncimea de câte 30,5 cm și trei cupe cu adâncimea de câte 152,4 mm. Astfel se poate examina o serie mare de adâncimi ale patului de boabe. Tăvile se pot scoate și introduce cu ușurință.

În timpul experienței, modificările în greutate a cupelelor s-au observat prin citire pe scala balanței, iar modificările în greutate a tăvilor s-au determinat separat pe o balanță de laborator.

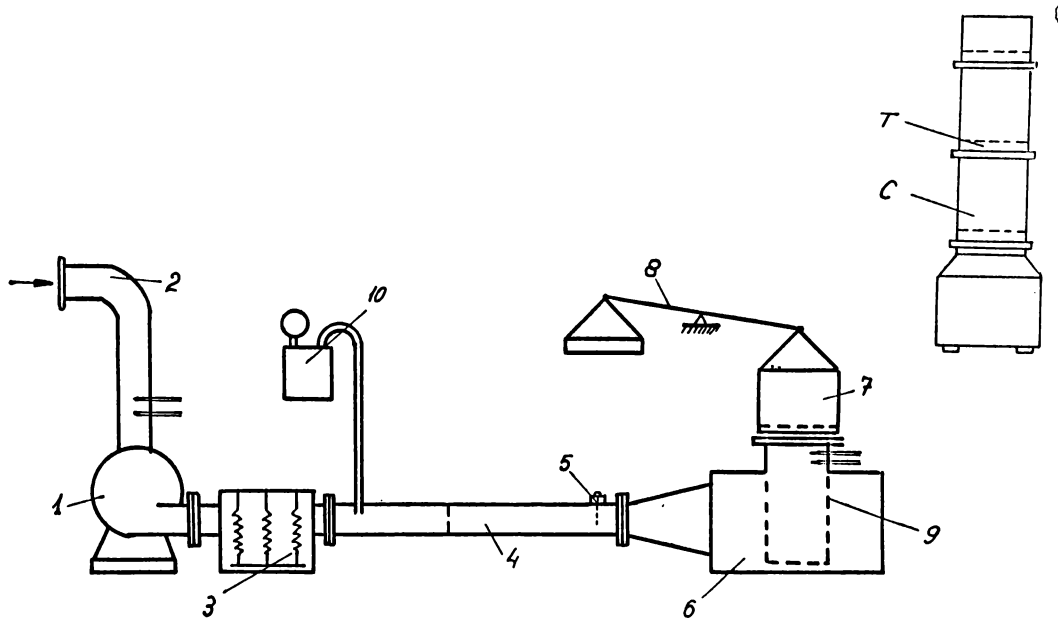


Fig. 2.32. Instalația experimentală utilizată de ALLEN, [1]

Analizînd atent stadiul actual al cercetărilor privind uscarea semințelor se desprind cîteva aspecte negative ce sînt reliefate în cele ce urmează.

1. Foarte mulți cercetători au efectuat studii teoretice și experimentale asupra uscării semințelor dispuse într-un strat gros de o sămîntă ceea ce nu se întîlnește în uscătoarele industriale.

2. Alți cercetători au aplicat relațiile 2.16 și 2.17 corespunzătoare stratului subțire la uscarea straturilor adânci. Pentru aplicarea acestor relații trebuie să se cunoască temperatura și umiditatea agentului de uscare la diferite nivele în strat. Însă de-a lungul unui strat adânc de semințe prin care se suflă aer cald, atât temperatura cât și umiditatea aerului, variază în funcție de timp după legi necunoscute încă. Deci semințele de la diferite nivele în strat se vor găsi în condiții de mediu variabile. Temperatura și umiditatea semințelor vor avea deci o variație în timp și spațiu dependentă de aceste condiții. De aceea aplicarea teoriei stratului subțire la uscarea stratului adânc nu reflectă condițiile existente în instalațiile de tip industrial.

3. Cercetările teoretice privind variația temperaturii și umidității într-un strat dens de semințe s-au oprit, doar la a prezenta ecuațiile care descriu fenomenul. Studiile efectuate de SPENCER [57] au permis rezolvarea ecuațiilor ce descriu fenomenul prin metoda diferențelor finite care însă nu definește temperatura semințelor la orice timp și la orice nivel în strat.

4. Alți cercetători [57] în cercetările lor au neglijat efectul condensării vaporilor de apă la suprafața semințelor, ori acest fenomen se produce neapărat în straturile superioare, încât are o influență directă asupra vitezei de uscare deci și asupra variației temperaturii semințelor.

3. STUDIUL TEORETIC PRIVIND REPARTIZAREA TEMPERATURII
INTR-UN STRAT DENS DE SEMINTE SUPUSE USCĂRII CU
AER CALD

3.1. Punerea problemei

Literatura de specialitate nu conține în prezent suficiente soluții analitice care să prescrie modul cum se repartizează temperatura de-a lungul unui strat dens de semințe care se usucă prin convecție cu aer cald. Aceste soluții sînt necesare atît în tehnica de proiectare a instalațiilor de uscat semințe, cît mai ales de a urmări în exploatarea modul de desfășurare a fenomenelor termice ce se petrec în uscătoarele de semințe.

Lipsa, pînă în prezent, a unui astfel de studiu din literatura de specialitate, are temeinice justificări prin aceea că, procesul de uscare convectiv al semințelor este un proces care depinde de un număr foarte mare de variabile. Fenomenul deosebit de complex al procesului de uscare se caracterizează prin următoarele :

- schimbul de căldură dintre agentul de uscare și semințe, produce o variație a temperaturii agentului de uscare de-a lungul stratului, încît, semințele de la diferite nivele din strat se vor găsi în regimuri de uscare diferite ;

- deplasarea nestaționară a umidității în interiorul semințelor are loc atît prin difuzie cît și prin termodifuzie ;

- deplasarea umidității de pe suprafața semințelor în agentul de uscare ce trece prin strat, provoacă o variație a umidității agentului de uscare atît în timp cît și de-a lungul stratului de semințe ;

- conductivitatea termică (λ) a semințelor este variabilă atât în funcție de umiditatea semințelor, cât și de temperatura de încălzire a acestora ;

- transmisivitatea termică (α) este variabilă atât în funcție de temperatură, cât mai ales de viteza agentului de uscare care variază de-a lungul stratului ;

- coeficientul de uscare (k) este variabil atât în funcție de temperatura agentului de uscare, cât și de umiditatea semințelor ;

- neuniformitatea mărimii și formei semințelor fapt ce produce o neuniformitate a fracțiunii de gol, (ϵ), apărînd concentrări ale agentului de uscare într-o anumită zonă.

În afară de acestea trebuie să se țină seama că bobul este un organism viu și modul de legare a apei cu materialul este de natură chimică și fizică, iar distribuția umidității în semințe este neuniformă, cea mai mare cantitate de apă se găsește în embrion care nu se elimină decît la durată mare de uscare. De asemenea trebuie să se aibă în vedere că atât viteza de uscare, cât și viteza de încălzire a semințelor să nu aibă valori prea mari, deoarece pot apărea tensiuni interne în bob care produc fisuri ce compromit capacitatea germinativă a semințelor, sau chiar și însușirile de panificație.

În studiul de față se prezintă un model matematic de repartizare în raport cu timpul a temperaturii într-un strat dens de semințe prin care se suflă aer cald.

Ținînd seama de caracteristicile enumerate mai sus care dau fenomenului de uscare o natură complexă, apare necesitatea de a se introduce o serie de ipoteze simplificatoare care din punct de vedere practic nu afectează hotărîtor

fenomenul, și anume :

- semințele sînt de formă și mărime uniformă și au o densitate uniformă în strat ;

- nu se ține seama de distribuția temperaturii și umidității în interiorul bobului ;

- se neglijează transferul de căldură prin contact (între semințe) precum și cel prin radiație ;

- transmisivitatea termică, coeficientul de uscare, căldura masică a aerului și a semințelor precum și căldura latentă de vaporizare se consideră constante ;

- se neglijează contracția semințelor în timpul uscării ;

- viteza agentului de uscare se consideră constantă de-a lungul stratului ;

- umiditatea inițială este distribuită uniform în strat ;

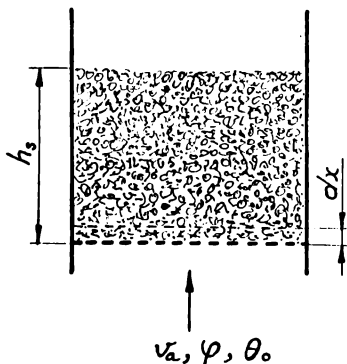
- toată evaporarea se produce la suprafața grăunțelor ;

- problema este studiată unidimensional (deci se cercetează repartizarea temperaturii de-a lungul stratului în direcția de curgere a aerului).

3.2. Ecuația care descrie temperatura aerului

Forme a ecuațiilor care descriu temperatura semințelor și a aerului sînt menționate și în lucrările altor autori [39, 57] . S-a găsit însă de cuvîntă a se demonstra amănunțit formarea lor pentru a se putea vedea mai bine în ce fel fiecare mărime influențează modul de rezolvare a ecuațiilor.

La trecerea aerului cald printr-un strat dens de semințe umede (fig. 3.1) se produce un schimb de căldură și de



umiditate dintre aer și semințe. Aerul cedă o parte din căldura sa semințelor, iar semințele cedau o parte din umiditatea lor aerului. Ca urmare temperatura aerului va scădea iar temperatura semințelor va crește. De asemenea umiditatea semințelor se va micșora pe seama creșterii umidității aerului.

Fig. 3.1. Stratul de semințe supus uscării

Se consideră un element de volum din stratul de semințe cu aria egală cu S și cu adâncimea dx .

Entalpia aerului care intră în elementul de volum prin suprafața S în timpul $d\tau$ este :

$$I_i = G_a \cdot c_a \cdot \theta(x, \tau) \cdot d\tau \quad (3.1)$$

Entalpia aerului care iese din elementul de volum în timpul $d\tau$ este :

$$I_e = G_a \cdot c_a \cdot \left[\theta(x, \tau) + \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \cdot dx \right] \cdot d\tau \quad (3.2)$$

Ca urmare a trecerii aerului prin strat se produce o variație a entalpiei aerului în raport cu variabila x și o variație în raport cu variabila τ .

Variația entalpiei aerului în raport cu variabila x este diferența relațiilor (3.1) și (3.2), adică :

$$G_a \cdot c_a \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \cdot dx \cdot d\tau \quad (3.3)$$

Variația entalpiei aerului din elementul de volum $S \cdot dx$ în raport cu timpul este :

$$\varepsilon \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \quad (3.4)$$

Variația totală a entalpiei aerului din elementul de volum $S \cdot dx$ în timpul $d\tau$ este :

$$c_a \cdot S \cdot dx \cdot d\tau \cdot \left[\frac{G_a}{S} \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} + \varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} \right] \quad (3.5)$$

Variația entalpiei aerului este produsă datorită faptului că aerul, la trecerea prin stratul de semințe cedează semințelor prin convecție o cantitate de căldură dată de expresia :

$$Q = \alpha \cdot A_1 \cdot [\theta(x, \tau) - T(x, \tau)] \cdot S \cdot dx \cdot d\tau \quad (3.6)$$

egală tocmai cu variația de entalpie a aerului ; deci :

$$\begin{aligned} \alpha \cdot A_1 [T(x, \tau) - \theta(x, \tau)] &= \\ &= c_a \cdot \left[\frac{G_a}{S} \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} + \varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

unde A_1 este aria de transfer din interiorul stratului; se determină cu relația :

$$A_1 = \frac{a_m \cdot \varepsilon}{v_m} \quad (3.8)$$

3.3. Ecuatia care descrie temperatura semințelor

O parte din căldura cedată semințelor de către aer (relația 3.6), este folosită pentru încălzirea semințelor din elementul de volum $S \cdot dx$ producând variația în timp a temperaturii acestora ; această cantitate de căldură este dată de expresia :

$$Q_{inc} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \cdot S \cdot dx \cdot d\tau \quad (3.9)$$

O altă parte din căldura primită de semințe este folosită pentru evaporarea umezelii din semințe și va produce răcirea semințelor ; această cantitate de căldură este dată de relația :

$$Q_{ev} = (1-\varepsilon) \cdot l_v \cdot \rho_0 \cdot m \cdot S \cdot dx \cdot d\tau \quad (3.10)$$

Făcînd bilanțul termic în elementul de volum $S \cdot dx$ se obține :

$$\alpha \cdot A_1 \cdot [\theta(x, \tau) - T(x, \tau)] = (1-\varepsilon) \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + (1-\varepsilon) \cdot \rho_0 \cdot l_v \cdot m \quad (3.11)$$

Pentru a găsi legile de variație a temperaturii semințelor și a temperaturii aerului în raport cu cele două coordonate x și τ se rezolvă sistemul format din ecuațiile (3.7) și (3.11).

3.4. Rezolvarea analitică

Rezolvarea sistemului format din ecuațiile (3.7) și (3.11) pe cale analitică este foarte dificilă datorită prezenței a două derivate parțiale ale funcției $\theta(x, \tau)$. Apare deci necesitatea introducerii unor ipoteze simplificatoare precum și a unor condiții de integrare legate fenomenologic de sistem.

O primă simplificare constă în neglijarea derivatei în raport cu timpul a funcției $\theta(x, \tau)$ care, așa cum arată cercetările experimentale ale altor autori [3, 57] , aceasta reprezintă cca 2 % din derivata în raport cu adîncimea stratului a funcției $\theta(x, \tau)$ și deci pentru scopuri practice nu reprezintă inconveniente prea mari. În acest caz ecuațiile (3.7) și (3.11) iau forma :

$$\frac{c_a \cdot G_a}{\alpha \cdot A_1 \cdot S} \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} = T(x, \tau) - \theta(x, \tau) \quad (3.12)$$

$$\frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_m \cdot c_m}{\alpha \cdot A_1} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \theta(x, \tau) - T(x, \tau) - \frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_0 \cdot l_v \cdot m}{\alpha \cdot A_1} \quad (3.14)$$

Se fac următoarele notări :

$$\frac{c_a \cdot G_a}{\alpha \cdot A_1 \cdot S} = A \quad (3.15)$$

$$\frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_m \cdot c_m}{\alpha \cdot A_1} = B \quad (3.16)$$

$$\frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_0 \cdot l_v}{\alpha \cdot A_1} = C \quad (3.17)$$

și se obține sistemul :

$$A \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} = T(x, \tau) - \theta(x, \tau) \quad (3.18)$$

$$B \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \theta(x, \tau) - T(x, \tau) - C \cdot m \quad (3.19)$$

O primă condiție de integrare a sistemului (3.18 - 3.19) este cea care precizează temperatura agentului de uscare la baza stratului, adică :

$$\theta(0, \tau) = \theta_0 = \text{constant} \quad (3.20)$$

O altă condiție este cea care prescrie temperatura semințelor în strat la câteva momente. Pentru cazul nestaționar este necesar să se stabilească condiția în care se găsesc semințele de la un anumit nivel la momentul în care aerul cald ajunge la nivelul respectiv. Timpul folosit de aerul de uscare pentru traversarea unei distanțe x , de-a lungul stratului este x/v_a . Prin urmare temperatura inițială a semințelor va fi precizată la $\tau = x/v_a$, adică

$$\lim_{\tau \rightarrow \frac{x}{v_a}} T(x, \frac{x}{v_a}) = T_0 = \text{constant} \quad (3.21)$$

adică $T(0, 0) = T_0$

Pentru rezolvarea sistemului (3.18 - 3.19) în condițiile (3.20 - 3.21), se folosește metoda calculului operațional folosind transformarea Laplace [2, 6, 21].

Această metodă are avantajul că permite transformarea unui sistem de ecuații cu derivate parțiale liniare, așa cum este sistemul (3.18 - 3.19), într-un sistem algebric a cărui rezolvare este mai ușoară.

Din calculul operațional [2, 17, 58, 59], se cunoaște că transformarea Laplace leagă două funcții între ele prin relația :

$$F(s) = \mathcal{L}f(\tau) = \int_0^{\infty} f(\tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} \cdot d\tau. \quad (3.22)$$

Aplicând transformarea Laplace pentru fiecare termen al ecuațiilor sistemului (3.18 - 3.19) se obține :

$$\mathcal{L}T(x, \tau) = \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot T(x, \tau) \cdot d\tau = h(x, s) \text{ pentru } s > 0$$

$$\mathcal{L}\theta(x, \tau) = \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot \theta(x, \tau) \cdot d\tau = H(x, s)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} &= \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \cdot d\tau = \frac{d}{dx} \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot \theta(x, \tau) \cdot d\tau = \\ &= \frac{dH(x, s)}{dx} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau = e^{-s\tau} \cdot T(x, \tau) \Big|_0^{\infty} + s \int_0^{\infty} T(x, \tau) \cdot e^{-s\tau} \cdot d\tau = \\ &= s \cdot h(x, s) - T_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}C.m &= \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot C.m \cdot d\tau = C.m \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \cdot d\tau = - \frac{C.m}{s} \cdot e^{-s\tau} \Big|_0^{\infty} = \\ &= \frac{C.m}{s} \end{aligned}$$

În acest caz sistemul (3.18-3.19) devine :

$$A \cdot \frac{dH(x, s)}{dx} = h(x, s) - H(x, s) \quad (3.23)$$

$$B \cdot \left[s \cdot h(x, s) - T_0 \right] = H(x, s) - h(x, s) - \frac{C \cdot m}{s} \quad (3.24)$$

iar condiția (3.20) devine :

$$H(0, s) = \frac{\theta_0}{s} \quad (3.25)$$

Dacă se notează $C \cdot m = q$ atunci din ecuația (3.24) rezultă :

$$h(x, s) = \frac{H(x, s)}{B \cdot s + 1} + \frac{B \cdot T_0 \cdot s - q}{(B \cdot s + 1) \cdot s} \quad (3.26)$$

care introdusă în ecuația (3.23) se obține :

$$\left[\frac{dH(x, s)}{dx} + \frac{B \cdot s \cdot H(x, s)}{A \cdot (B \cdot s + 1)} - \frac{B \cdot T_0 \cdot s - q}{A \cdot s \cdot (B \cdot s + 1)} = 0 \right] \quad (3.27)$$

Ecuația (3.27) este o ecuația diferențială liniară de ordinul întâi, neomogenă a cărei soluție generală este: [29]

$$H(x, s) = e^{-\int_0^x \frac{B \cdot s \cdot du}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} \cdot \left[K + \int_0^x \frac{B \cdot T_0 \cdot s - q}{A \cdot s \cdot (B \cdot s + 1)} \cdot e^{\int_0^u \frac{B \cdot s \cdot dx}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} \cdot du \right] \quad (3.28)$$

Constanta de integrare K se determină din condiția (3.25). Se obține astfel soluția ecuației (3.27) sub forma :

$$H(x, s) = \frac{T_0}{s} - \frac{q}{B \cdot s^2} + \frac{\theta_0 - T_0}{s} \cdot e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} + \frac{q}{B \cdot s^2} \cdot e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} \quad (3.29)$$

Pentru inversiunea funcției (3.29) se folosește integrala lui Bromwich [2, 21, 17, 58] care are forma

$$\theta(x, \tau) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} e^{s\tau} \cdot H(x, s) \cdot ds \quad \text{pentru } \tau \geq 0 \quad (3.30) \\ \text{și } \sigma > 0$$

Conform teoremei lui Cauchy [2, 21, 17, 58] integrala este egală cu suma reziduurilor integrandului în punctele singulare ; adică :

$$I = 2\pi i \cdot \sum \operatorname{Rez} \left[e^{s\tau} \cdot H(x, s) \right]$$

deci relația (3.30) devine :

$$\theta(x, \tau) = \sum \operatorname{Rez} \left[e^{s\tau} \cdot H(x, s) \right] \quad (3.31)$$

Teorema reziduurilor [2, 58] arată că reziduul unei funcții $f(z)$ în punctul z_0 care este un pol de ordinul p este

$$\operatorname{Rez}_{z=z_0} f(z) = \frac{1}{(p-1)!} \cdot \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{d^{p-1}}{dz^{p-1}} \left[f(z) \cdot (z-z_0)^p \right] \quad (3.32)$$

iar dacă z_0 este un punct singular esențial, atunci se dezvoltă funcția $f(z)$ în serie Laurent și coeficientul A_{-1} din dezvoltare reprezintă tocmai reziduul funcției $f(z)$ în z_0 , (adică coeficientul lui $\frac{1}{z-z_0}$).

După înmulțirea soluției (3.29) cu $e^{s\tau}$, aceasta se mai poate scrie sub forma :

$$H(x, s) = \varphi_1(s) + \varphi_2(s) + \varphi_3(x, s) + \varphi_4(x, s) \quad (3.33)$$

Funcția $\varphi_1(s) = \frac{T_0 \cdot e^{s\tau}}{s}$, are un reziduu în $s = 0$ (pol simplu) a cărui valoare este :

$$\operatorname{Rez}_{s=0} \varphi_1(s) = T_0 \quad (3.34)$$

Funcția $\varphi_2(s) = \frac{q \cdot e^{s\tau}}{B \cdot s^2}$, are un reziduu în $s = 0$ (pol dublu), a cărui valoare este :

$$\operatorname{Rez}_{s=0} \varphi_2(s) = \frac{-q \cdot \tau}{B} \quad (3.35)$$

Funcția $\varphi_3(x, s) = \frac{\theta_0 - T_0}{s} \cdot e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} + s \cdot \tau$, are un reziduu în $s = 0$ (pol simplu), a cărui valoare este :

$$\operatorname{Rez}_{s=0} \varphi_3(x, s) = \theta_0 - T_0 \quad (3.36)$$

Funcția $\varphi_3(x, s)$ mai are un reziduu în $s = -\frac{1}{B}$,

care este un punct singular esențial. Pentru a găsi acest reziduu se dezvoltă funcția în serie Laurent în jurul punctului $s = -\frac{1}{B}$.

Factorul $\frac{\theta_0 - T_0}{s}$ se mai poate scrie :

$$\frac{\theta_0 - T_0}{s} = (\theta_0 - T_0) \frac{B}{B \cdot s} = (\theta_0 - T_0) \cdot \frac{B}{B \cdot s + 1 - 1} = (\theta_0 - T_0) \cdot \frac{-B}{1 - (B \cdot s + 1)}$$

a cărui dezvoltare este :

$$B(T_0 - \theta_0) \cdot \left[1 + (B \cdot s + 1) + (B \cdot s + 1)^2 + (B \cdot s + 1)^3 + \dots \right] \quad (3.37)$$

Pentru a dezvolta factorul $e^{s \cdot \tau}$, acesta se scrie astfel :

$$e^{s \cdot \tau} = e^{\frac{\tau}{B} \cdot (B \cdot s + 1 - 1)} = e^{-\frac{\tau}{B}} \cdot e^{\frac{\tau}{B} \cdot (B \cdot s + 1)}$$

Dezvoltarea factorului $e^{\frac{\tau}{B} \cdot (B \cdot s + 1)}$ este următoarea:

$$1 + \frac{\tau \cdot (B \cdot s + 1)}{1! B} + \frac{\tau^2 \cdot (B \cdot s + 1)^2}{2! B^2} + \frac{\tau^3 \cdot (B \cdot s + 1)^3}{3! B^3} + \dots \quad (3.38)$$

Deci factorul $e^{s \tau}$ are următoarea dezvoltare :

$$e^{-\frac{\tau}{B}} \cdot \left[1 + \frac{\tau \cdot (B \cdot s + 1)}{1! B} + \frac{\tau^2 \cdot (B \cdot s + 1)^2}{2! B^2} + \frac{\tau^3 \cdot (B \cdot s + 1)^3}{3! B^3} + \dots \right] \quad (3.39)$$

Pentru a dezvolta factorul $e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}}$, acesta se scrie astfel :

$$e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} = e^{-\frac{(B \cdot s + 1) \cdot x - x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} = e^{-\frac{x}{A}} \cdot e^{\frac{x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}} \quad (3.40)$$

Dezvoltarea factorului $e^{\frac{x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}}$ este următoarea :

$$1 + \frac{x}{A \cdot (B \cdot s + 1)} + \frac{x^2}{2! (B \cdot s + 1)^2 \cdot A^2} + \frac{x^3}{3! (B \cdot s + 1)^3 \cdot A^3} + \dots \quad (3.41)$$

Deci factorul $e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}}$ are următoarea dezvoltare :

$$e^{-\frac{x}{A}} \cdot \left[1 + \frac{x}{A \cdot (B \cdot s + 1)} + \frac{x^2}{2! A^2 \cdot (B \cdot s + 1)^2} + \frac{x^3}{3! A^3 \cdot (B \cdot s + 1)^3} + \dots \right] \quad (3.42)$$

Reziduuul funcției $\varphi_3(x, s)$, va fi coeficientul termenului $\frac{1}{s + \frac{1}{B}}$ din produsul :

$$\begin{aligned}
 & B \cdot (T_0 - \theta_0) \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{c}{B}} \cdot \left[1 + (B \cdot s + 1) + (B \cdot s + 1)^2 + \dots \right] \cdot \\
 & \cdot \left[1 + \frac{c \cdot (B \cdot s + 1)}{1! B} + \frac{c^2 \cdot (B \cdot s + 1)^2}{2! B^2} + \frac{c^3 \cdot (B \cdot s + 1)^3}{3! B^3} + \dots \right] \cdot \\
 & \cdot \left[1 + \frac{x}{A \cdot (B \cdot s + 1)} + \frac{x^2}{2! A^2 \cdot (B \cdot s + 1)} + \frac{x^3}{3! A^3 \cdot (B \cdot s + 1)} + \dots \right]
 \end{aligned}$$

Prin efectuarea produsului celor trei serii, se obține o nouă serie, iar coeficientul termenului $\frac{1}{s + \frac{1}{B}}$ care este tocmai reziduul căutat are forma :

$$\begin{aligned}
 \text{Rez } \varphi_3(x, s) = (T_0 - \theta_0) \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{c}{B}} \cdot \left[e^{\frac{x}{A}} - 1 + \right. \\
 s = -\frac{1}{B} \quad \left. + \frac{c}{B} \cdot \left(e^{\frac{x}{A}} - 1 - \frac{x}{A} \right) + \right. \\
 \left. + \frac{c^2}{2! B^2} \cdot \left(e^{\frac{x}{A}} - 1 - \frac{x}{A} - \frac{x^2}{2! A^2} \right) + \right. \\
 \left. + \frac{c^3}{3! B^3} \cdot \left(e^{\frac{x}{A}} - 1 - \frac{x}{A} - \frac{x^2}{2! A^2} - \frac{x^3}{3! A^3} \right) + \right. \\
 \left. + \dots \dots \dots \right] \quad (3.43)
 \end{aligned}$$

care se mai poate scrie :

$$\begin{aligned}
 \text{Rez } \varphi_3(x, s) = (T_0 - \theta_0) \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{c}{B}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{c}{B}\right)^n}{n!} \cdot \left[e^{\frac{x}{A}} - \beta_n(x) \right] \\
 s = -\frac{1}{B} \quad (3.44)
 \end{aligned}$$

unde $\beta_n(x)$ reprezintă sumele parțiale din paranteza mare a relației (3.43), astfel :

$$\begin{aligned}
 \beta_0(x) &= 1 \\
 \beta_1(x) &= 1 + \frac{x}{A} \\
 \beta_2(x) &= 1 + \frac{x}{A} + \frac{x^2}{2! \cdot B^2} \\
 &\dots \dots \dots
 \end{aligned}$$

Funcția $\varphi_4(x, s) = \frac{g}{B \cdot s^2} \cdot e^{-\frac{B \cdot s \cdot x}{A \cdot (B \cdot s + 1)}}$ are un reziduu în $s=0$ (pol dublu), a cărui valoare este :

$$\text{Rez}_{s=0} \varphi_4(x,s) = -\frac{q \cdot x}{A} + \frac{q \cdot \sigma}{B} \quad (3.45)$$

Funcția $\varphi_4(x,s)$ mai are un reziduu în $s = -\frac{1}{B}$, care este un punct singular esențial.

Procedând ca în cazul găsirii reziduuului funcției $\varphi_3(x,s)$, rezultă că reziduuul funcției $\varphi_4(x,s)$, va fi coeficientul termenului $\frac{1}{1 + \frac{1}{B}}$ din produsul :

$$q \cdot B \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\sigma}{B}} \cdot \left[1 + 2 \cdot (B \cdot s + 1) + 3 \cdot (B \cdot s + 1) + 4 \cdot (B \cdot s + 1) + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{x}{A \cdot (B \cdot s + 1)} + \frac{x^2}{2! A^2 \cdot (B \cdot s + 1)} + \frac{x^3}{3! A^3 \cdot (B \cdot s + 1)} + \dots \right] \cdot \left[1 + \frac{\sigma \cdot (B \cdot s + 1)}{1! B} + \frac{\sigma^2 \cdot (B \cdot s + 1)^2}{2! B^2} + \frac{\sigma^3 \cdot (B \cdot s + 1)^3}{3! B^3} + \dots \right]$$

Prin efectuarea produsului celor trei serii se obține o nouă serie, iar coeficientul termenului $\frac{1}{1 + \frac{1}{B}}$, care este tocmai reziduuul căutat, va avea următoarea formă :

$$\text{Rez}_{s = -\frac{1}{B}} \varphi_4(x,s) = q \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\sigma}{B}} \cdot \left[\frac{x}{A} + \frac{2 \cdot x^2}{2! A^2} + \frac{3 \cdot x^3}{3! A^3} + \dots + \frac{\sigma}{B} \cdot \left(\frac{x^2}{2! A^2} + \frac{2 \cdot x^3}{3! A^3} + \frac{3 \cdot x^4}{4! A^4} + \dots \right) + \frac{\sigma^2}{2! B^2} \cdot \left(\frac{x^3}{3! A^3} + \frac{2 \cdot x^4}{4! A^4} + \frac{3 \cdot x^5}{5! A^5} + \dots \right) + \dots \right] \quad (3.46)$$

care se mai poate scrie :

$$\text{Rez}_{s = -\frac{1}{B}} \varphi_4(x,s) = q \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\sigma}{B}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\sigma}{B}\right)^n}{n!} \cdot \gamma_n(x) \quad (3.47)$$

unde $\gamma_n(x)$ reprezintă sumele parțiale din paranteza mare a re-

lației (3.46), astfel :

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{x}{A} + \frac{2 \cdot x^2}{2!A^2} + \frac{3 \cdot x^3}{3!A^3} + \dots \\ \gamma_1 &= \frac{x^2}{2!A^2} + \frac{2 \cdot x^3}{3!A^3} + \frac{3 \cdot x^4}{4!A^4} + \dots \\ \gamma_2 &= \frac{x^3}{3!A^3} + \frac{2 \cdot x^4}{4!A^4} + \frac{3 \cdot x^5}{5!A^5} + \dots \\ &\dots \end{aligned}$$

Utilizând relațiile (3.34), (3.35), (3.36), (3.44), (3.45), (3.47), se obține originalul funcției $H(x,s)$, care are forma :

$$\begin{aligned} \theta(x, \tau) &= \theta_0 - q \cdot \frac{x}{A} - \\ &- (\theta_0 - T_0) \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\tau}{B}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\tau}{B}\right)^n \cdot \left[e^{\frac{x}{A}} - \beta_n(x) \right] + \\ &+ q \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\tau}{B}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\tau}{B}\right)^n \cdot \gamma_n(x) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Utilizând ecuația (3.18) se obține și originalul funcției $h(x,s)$ care are forma :

$$\begin{aligned} T(x, \tau) &= \theta_0 - q \left(\frac{x}{A} + 1 \right) - \\ &- (\theta_0 - T_0) \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\tau}{B}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\tau}{B}\right)^n \cdot \left[e^{\frac{x}{A}} - \beta_{n-1}(x) \right] + \\ &+ q \cdot e^{-\frac{x}{A} - \frac{\tau}{B}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\tau}{B}\right)^n \cdot \gamma_{n-1}(x) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Expresiile (3.48) și (3.49) reprezintă soluțiile sistemului (3.18 - 3.19) în condițiile (3.20-3.21).

Soluția (3.48) reprezintă legea de variație în raport cu timpul a temperaturii aerului de-a lungul stratului de semințe, iar soluția (3.49) reprezintă legea de repartizare în raport cu timpul a temperaturii semințelor de-a lungul unui strat adânc care se usucă prin convecție cu aer cald.

Analizând soluțiile (3.48) și (3.49), se constată că termenii doi și trei sînt sub forma unei sume în funcție finite care converge rapid și a căror termeni descresc.

Considerînd doar primul termen al fiecărei din sumele menționate și ținînd seama că $q = C.m.$, se obțin relațiile :

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 - C.m. \frac{x}{A} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) - (\theta_0 - T_0) \cdot e^{-\frac{\tau}{B}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{A}}\right) \quad (3.50)$$

$$T(x, \tau) = \theta_0 - C.m. \left(1 + \frac{x}{A}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) - (\theta_0 - T_0) \cdot e^{-\frac{\tau}{B}} \quad (3.51)$$

Este evident că prin simplificarea efectuată se produce o anumită eroare în precizarea temperaturii aerului respectiv a semințelor la un anumit moment și într-un anumit punct în strat. Nu mi-am propus să evaluez această eroare deoarece așa cum o vor arăta verificările experimentale prin această simplificare relațiile (3.50) și (3.51), descriu foarte bine fenomenul cercetat.

De altfel după un timp de uscare mare, termenii doi și trei din relațiile (3.48) și (3.49) au valori

foarte mici încît pentru scopuri practice simplificarea făcută nu numai că nu prezintă inconveniente, dar are avantajul de a fi ușor de aplicat ecuația (3.51).

Prin reprezentarea grafică a soluției (3.51) se va constata (figurile 5.8 - 5.24), că variația puternică a temperaturii semințelor se va produce în primele 10 - 30 minute de la începerea uscării. Valorile inferioare ale intervalului corespund pentru umidități reduse a semințelor, iar valorile superioare corespund umidităților ridicate. După acest interval valoarea exponențialelor este atît de mică încît contribuția lor asupra variației temperaturii semințelor este nesemnificativă.

După un timp de uscare mare, viteza de uscare "m" are variații foarte mici, de aceea variația temperaturii semințelor la diferite nivele se va reprezenta grafic sub forma unor drepte paralele - cele superioare corespund nivelelor superioare ale stratului.

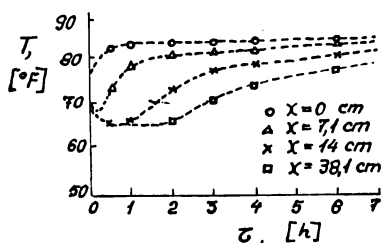


Fig. 3.2. Variația temperaturii semințelor în strat, după KUANG [34].

Fenomenul este observat și în cercetările experimentale ale lui KUANG [34], prezentate în figura 3.2.

După cum s-a menționat în capitolul 2, semințele

culturilor agricole se comportă în procesul de uscare în așa fel încât viteza de uscare "m" este descrescătoare.

Pentru uscarea semințelor de porumb a fost găsită expresia teoretică a vitezei de uscare [45], care are forma :

$$m = \frac{512 \cdot k}{\pi^6} \cdot (U_0 - U_e) \cdot e^{-k \cdot \tau} \quad (3.52)$$

Tinând seama de expresia vitezei de uscare, soluțiile (3.50) și (3.51) devin :

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 - \frac{512 \cdot C \cdot k}{6} \cdot (U_0 - U_e) \cdot e^{-k \tau} \cdot \frac{x}{A} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) - (\theta_0 - T_0) \cdot e^{-\frac{\tau}{B}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{A}}\right) \quad (3.53)$$

$$T(x, \tau) = \theta_0 - (\theta_0 - T_0) \cdot e^{-\frac{\tau}{B}} - \frac{512 \cdot C \cdot k}{6} \cdot (U_0 - U_e) \cdot e^{-k \cdot \tau} \cdot \left(1 + \frac{x}{A}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{B}}\right) \quad (3.54)$$

În alcătuirea relației (3.54) intră umiditatea de echilibru (U_e), care este dependentă de temperatura și de umiditatea relativă a aerului din jurul bobului. Pentru o reprezentare grafică a soluției (3.54) este necesar a se cunoaște în mod precis umiditatea de echilibru.

Un număr apreciabil de cercetători s-au preocupat de găsirea unei formule matematice care să lege umiditatea de echilibru a semințelor de temperatura și umiditatea agentului de uscare [12, 20, 27, 36, 44]. FINN - KELCEY și HULBERT [1] s-au angajat în producerea unui set de curbe experimentale a umidității de echilibru pentru diferite boabe și rezultatele pot ajuta pe cei interesați în depozitarea semințelor.

Lucrarea lui SIMMONS, WARD și McEWEN [49] diferă de cea a cercetătorilor de mai sus prin introducerea noțiunii de umiditate de echilibru dinamic deosebită de valoarea statică utilizată pînă atunci. Deosebirea dintre cele două valori ale umidității de echilibru se datorește faptului că boabele sînt vii și își schimbă natura fizică și chimică în funcție de mediu. În timp ce procesul de uscare este rapid, adaptarea la mediu a structurii boabelor este un proces lent.

După cercetările lui ALLEN [1], aplicarea umidității de echilibru static la procesul normal de uscare efectuat în uscătoarele comerciale, nu este corespunzătoare. În timpul procesului de uscare există un gradient de umiditate în interiorul bobului ; deci boabele uscate la o temperatură ridicată, cu un gradient de umiditate ridicat, prezintă față de aerul de uscare o suprafață nereprezentativă pentru toată masa bobului.

Aceasta duce la valoarea de echilibru prematur, la un conținut de umiditate ceva mai ridicat decît cel al umidității de echilibru static. Această situație prematură, asimptotică față de o valoare de echilibru a conținutului de umiditate în timpul unui proces de uscare este de natură dinamică.

O valoare precisă a umidității de echilibru static nu este ușor de obținut, deoarece observațiile au arătat că boabele continuă să piardă din greutate cel puțin încă șase luni de la recoltare și acest proces poate continua. Se pare chiar că modificările fizice și chimice care apar în bobul viu, fac ca valoarea finală să se obțină numai după o perioadă infinită. În absența unui procedeu exact pentru determinarea umidității de echilibru static în mod expeditiv, ALLEN [1] consideră că, conceptul de umiditate de echilibru dinamic are un merit considerabil. În scopul descrierii și precizării analitice a proceselor de uscare a semințelor, umiditatea de echilibru dinamic este opțiunea logică, dar pentru problemele de înmagazinare este mai indicată umiditatea de echilibru static.

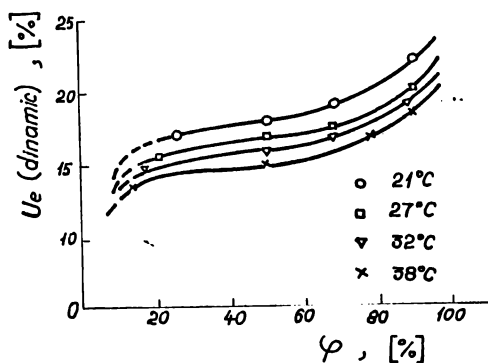


Fig. 3.3. Curbele umidității de echilibru, după ALLEN [1]

În fig. 3.4, se dau câteva din curbele umidității de echilibru dinamic folosite de SHU-TUNG [55] la uscarea porumbului, iar în fig. 3.3, se dau curbele umidității de echilibru dinamic, folosite de ALLEN [1] la uscarea porumbului în strat dens.

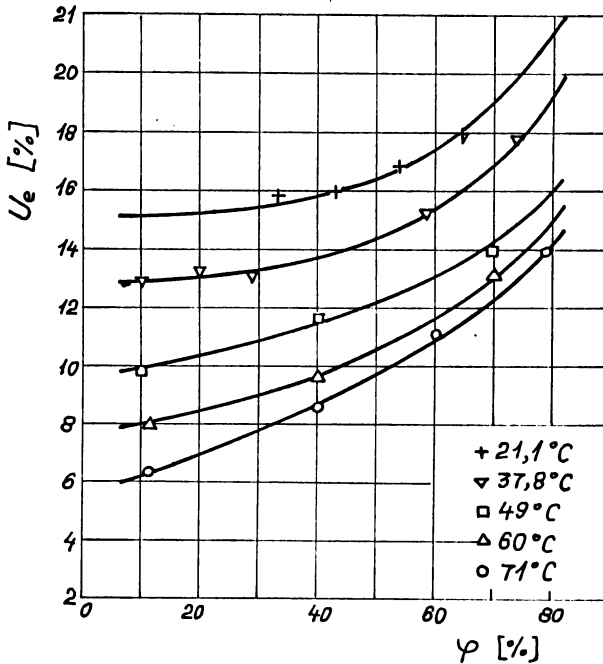


Fig. 3.4. Curbele umidității de echilibru, după THU-TUNG [5]

Cercetările fundamentale efectuate de HENDERSON [23] pe baza cărora THOMPSON [58] a creat un nou model matematic de uscare a porumbului, au arătat că valoarea umidității de echilibru poate fi determinată de relația

$$U_e = \left[\frac{-\ln(1 - \varphi)}{(3,82 \cdot 10^{-6})(\theta_e + 50)} \right]^{0,5} \quad (3.55)$$

Valoarea lui θ_e este dată de formula (2.27).

În relația (3.54) intră coeficientul de uscare k , care de asemenea trebuie cunoscut pentru a putea reprezenta grafic soluția (3.54).

HENDERSON și PABIS [25] au arătat că coeficientul de uscare variază după relația :

$$k = d \cdot e^{-\frac{f}{T}} \quad (3.56)$$

unde constantele d și f se determină experimental. Relația 3.56 a fost verificată experimental și de către alți autori.

Astfel SIMMONDS [49] au uscat grîul în straturi subțiri într-un uscător de laborator la o viteză a aerului de 0,1632 m/s și la valori ale temperaturii aerului de la 20°C la 77°C. Variația lui k în funcție de temperatură după datele lui SIMMONDS [49] este arătată în figura 3.5 .

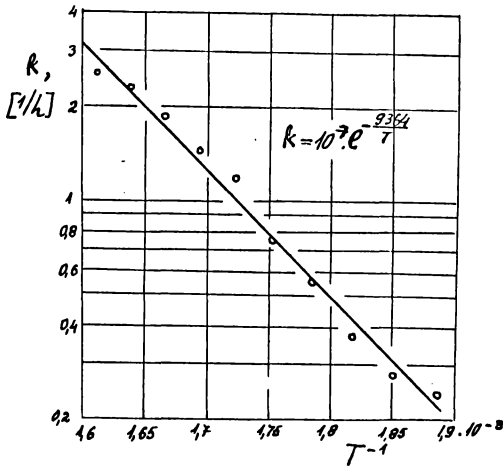


Fig. 3.5. Relația dintre coeficientul de uscare și inversul temperaturii pentru grîu, după datele lui SIMMONDS [49]

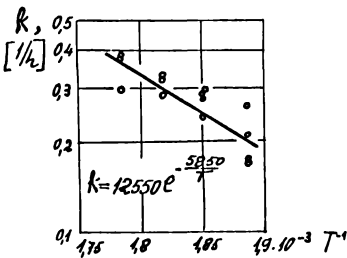


Fig. 3.6. Relația dintre coeficientul de uscare și inversul temperaturii pentru porumb după datele lui ALLEN [1]

ALLEN [1] a uscat porumbul în condiții asemănătoare celor lui SIMMONDS, însă cu o viteză a aerului de 0,3825 m/s și la valori ale temperaturii de la 20°C la 38°C. Datele sale sînt prezentate în figura 3.6 .

HENDERSON și PABIS [25] , au făcut experiențe cu porumb folosind o viteză a agentului de uscare de 0,4080 m/s și o temperatură a agentului de uscare de 38 pînă la 65°C. Rezultatele sînt prezentate în fig. 3.7.

HENDERSON și PABIS [26] , au uscat grîul într-un strat

subțire a cărui umiditate inițială a fost de 51,5 % iar viteza aerului a fost de 0,02 - 0,685 m/s. In fig. 3.8, se arată variația coeficientului de uscare în raport cu timpul pentru vi-

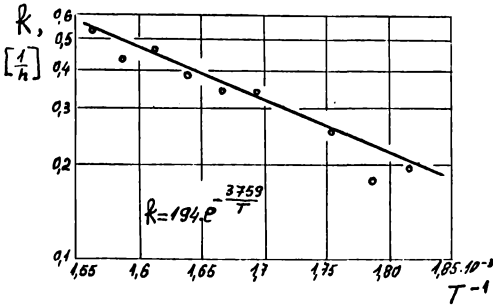


Fig. 3.7. Relația dintre coeficientul de uscare și inversul temperaturii pentru porumb după datele lui HENDERSON [25]

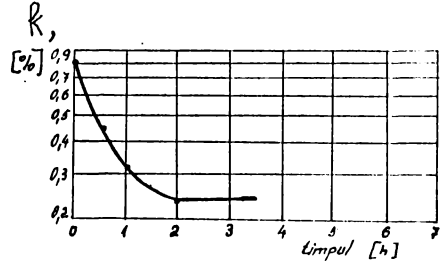


Fig. 3.8. Coeficientul de uscare la viteze mai mici de 0,453 m/s după [26]

teze ale agentului de uscare mai mici decât 0,453 m/s.

Determinarea precisă a umidității de echilibru dinamic și a coeficientului de uscare este foarte greoaie fiind necesare foarte multe măsurători. De aceea pentru a putea verifica totuși dacă soluția (3.51) descrie din punct de vedere matematic fenomenul de repartizare a temperaturii semințelor de-a lungul stratului, din curbele de uscare ridicate experimental, se determină grafic viteza de uscare [38], care se introduce apoi în soluția (3.51) obținându-se valoarea temperaturii în nivelele și la timpul la care s-a măsurat viteza de uscare.

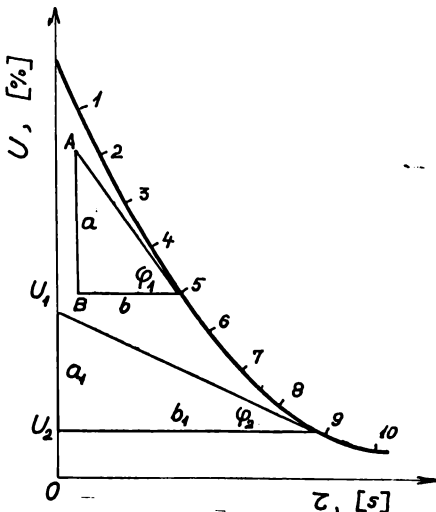


Fig. 3.9. Determinarea grafică a vitezei de uscare

Determinarea grafică a vitezei de uscare se face în felul următor: (fig. 3.9). Curba de uscare este împărțită într-un anumit număr de puncte (exemplu zece). Într-un anumit punct al curbei se duce o tangentă formându-se un triunghi dreptunghic arbitrar,

care are ca ipotenuză tangenta, iar catetele sînt formate de niște segmente paralele cu axele de coordonate. Astfel pentru punctul 5 am construit triunghiul AB5, iar tangenta trigonometrică a unghiului φ_1 ne dă chiar viteza de uscare în punctul 5, adică

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a}{b}, \frac{\%}{s} \quad (3.47)$$

Segmentul „a” se măsoară la scara diagramei, în procente, iar segmentul „b”, în secunde. Uneori este comod să se construiască triunghiul așa cum s-a făcut pentru punctul 9.

4. INSTALATIE EXPERIMENTALA SI METODA UTILIZATA LA
CERCETAREA REPARTIZARII TEMPERATURII SI UMIDITA-
TII INTR-UN STRAT DENS DE SEMINTE SUPUSE USCARII

4.1. Descrierea instalației

În figura 4.1 este prezentată vederea de ansamblu a instalației (fără camera de uscare), iar în figura 4.2 schița de principiu a instalației.



Fig. 4.1. Vedere generală a instalației experimentale (nu se vede camera de uscare)

În funcție de pământurile de prelucrare într-un strat dens de semințe pe suprafața mesei, nu se poate realiza repartizarea uniformă de aer cald în stratul de semințe, deoarece în stratul de aer cald se poate realiza o repartizare inegală de aer cald, care poate fi până la $0,07 \text{ m}^3/\text{g}$.

Pentru a cerceta fenomenul transferului de căldură

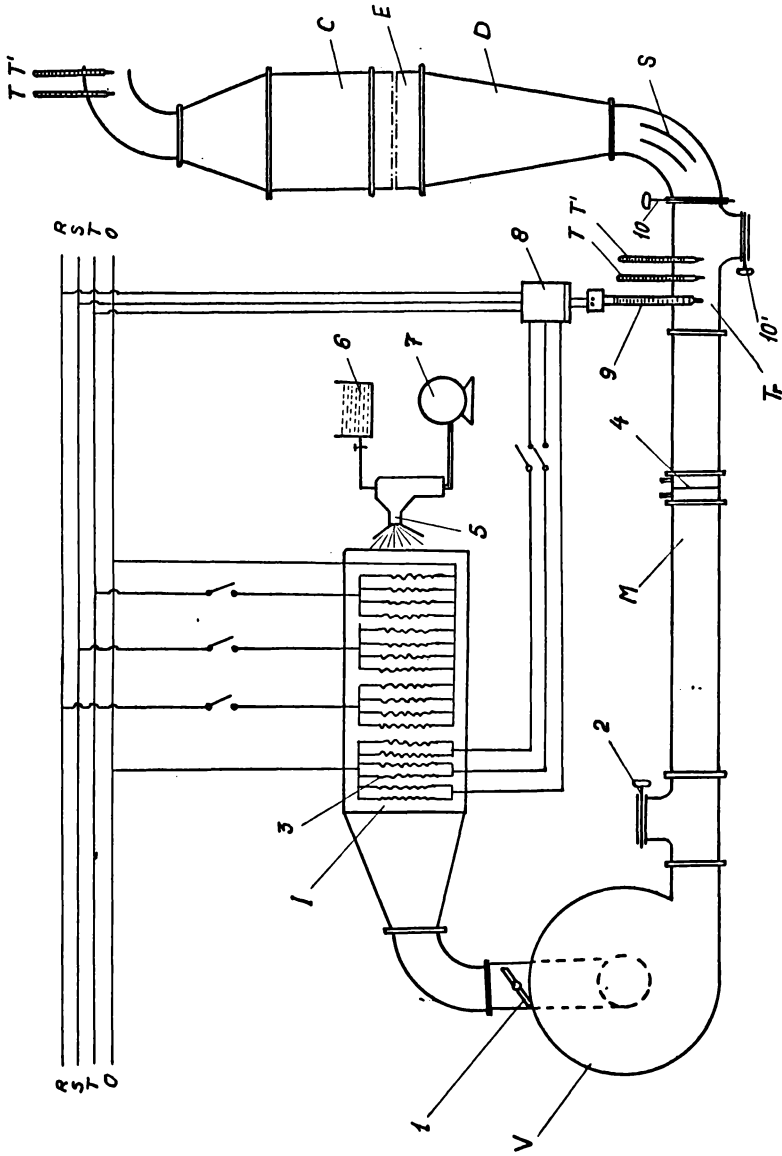


Fig. 4.2. Schema generală a instalației experimentale utilizate.

și de umiditate de la semințe la agentul de uscare, la diferite viteze ale acestuia, s-a prevăzut clapeta 1 în racordul de aspirație și șubărul 2 în racordul de refulare a ventilatorului, care permit obținerea unei viteze a agentului de uscare la baza stratului de $0,1 - 1,1$ m/s.

Pentru a cerceta influența temperaturii agentului de uscare asupra repartizării umidității și temperaturii semințelor de-a lungul stratului, s-a prevăzut un încălzitor (I) prezentat în fig. 4.3, care oferă posibilitatea de a încălzi agentul de uscare la diferite temperaturi, prin conectarea parțială la rețea a celor optsprezece rezistențe electrice (3) de câte 500 W fiecare, care se pot conecta la rețea grupate câte 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 și 18 bucăți. Un număr



Fig. 4.3. Incălzitorul de aer, cu dispozitivul de pulverizare a apei

de gaze rezistențe din total, sînt conectate la rețea prin intermediul roleiului termic B.

Rezistențele electrice ale încălzitorului trebuie să dezvolte o cantitate de căldură necesară de a încălzi debitul maxim de $0,07$ m³/s cu o creștere de temperatură de oca 60 grade.

Căldura necesară pentru a încălzi cei "m" m³ aer într-o secundă la o diferență de temperatură $\Delta\theta = 60$ K este :

$$Q_{nec} = m \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot \Delta\theta \quad (4.1)$$

Utilizînd valorile $m = 0,07$ m³/s

$$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$c_a = 1000 \text{ J/kg. grad.}$$

rezultă $Q_{nec} = 5050 \text{ W} = 5,05 \text{ kW}$.

Tinînd seama de faptul că de la încălzitor pînă la baza stratului de semințe se pierde o mare cantitate de căldură, puterea electrică a încălzitorului trebuie să fie mai mare. De asemenea în calcul s-a folosit capacitatea calorică a aerului uscat ; în realitate însă agentul de uscare este format din aer și vapori de apă rezultați de la umidificatorul de aer și care au o capacitate calorică mai mare. Deci și din acest motiv puterea încălzitorului electric trebuie să fie mai mare.

Un alt element important de care s-a ținut seama la construirea încălzitorului electric a fost și faptul că aerul are o inerție termică mare și pentru că în timpul experiențelor temperatura aerului trebuie să se mențină cît mai aproape de valoarea reglată cu ajutorul unui termometru cu contact, este necesar să se cupleze automat un număr mare de rezistențe.

În baza acestor considerente s-a construit încălzitorul cu o putere electrică de 9 kW (18 rezistențe de cîte 500 W fiecare) iar încercările efectuate au confirmat justetea soluției adoptate.

Pentru măsurarea debitului de aer care trece prin stratul dens de semințe, s-a utilizat unul din cele mai răs-

pîndite și studiate procedee, căderea de presiune într-un dispozitiv de laminare prin diafragmă (4). La trecerea aerului prin dispozitivul de laminare se creează o cădere de presiune care depinde de viteza acestuia și deci, de debitul de fluid. Valoarea numerică a debitului se determină prin calcul în funcție de căderea de presiune măsurată cu ajutorul unui micro manometru. Deoarece instalația construită necesită măsurători de debite care, corespund la numere REYNOLDS mici (15000 - 30000), a trebuit să se utilizeze o diafragmă dublă (fig. 4.4)

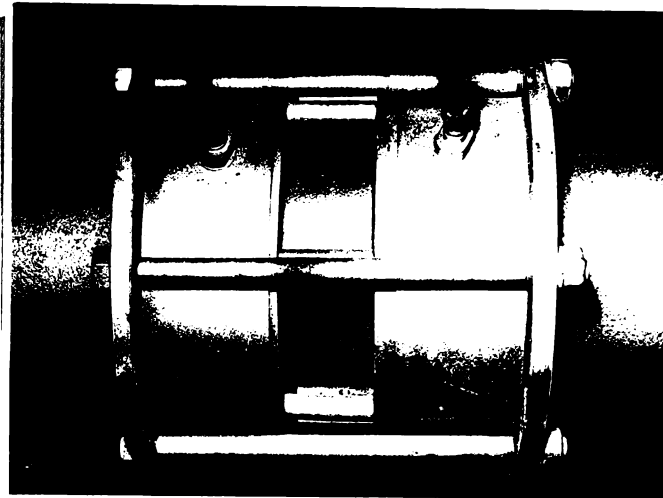


Fig. 4.4. Diafragma dublă.

pentru a reduce valoarea limită a numărului REYNOLDS, care nu asigură o valoare constantă a coeficientului de debit. La calculul, considerăm că montarea diafragmei a fost făcută cu manometrul dat în lucrarea lui V.P. PIVOVAROV [17]

Manometrul coeficientul diafragmei este calculat ținând seama de debitul maxim $m = 0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ ce trece prin stratul de seminte pentru care corespunde o viteză medie la baza stratului de $1,1 \text{ m/s}$.

Diaframele au fost confecționate din OL-70 ale căror orificii coincid cu centrul secțiunii conductei. În

partea de intrare a fluidului, orificiul diafragmei are o formă cilindrică ; ea se continuă cu o lărgire conică spre partea de ieșire, unghiul de înclinare fiind 45° . Grosimea diafragmei satisface condiția $s \leq 0,1 D$ (D - diametrul conductei în care s-a montat diafragma) ; lungimea părții cilindrice "a" a orificiului s-a determinat astfel încât $a \leq 0,02 D$. Suprafețele diafragmei au fost prelucrate cu multă îngrijire; s-a dat o atenție deosebită prelucrării muchiei de atac, care a trebuit să fie ascuțită, să nu prezinte bavuri, zgîrieturi, rotunjiri etc. Distanța dintre diafragma principală și suplimentară a fost determinată din relația $l_1 = 0,5 D = 50 \text{ mm}$.

Presiunile statice, înainte și după diafragmă, au fost prelevate cu ajutorul unor camere inelare, deoarece perturbațiile locale ale curentului deformează în mai mică măsură rezultatele măsurătorilor. Lățimea fantei inelare " n_1 " care leagă camera inelară cu conducta, s-a determinat din condiția $n_1 \leq 0,03 D$.

Montarea diafragmelor s-a făcut pe conducte orizontale. Porțiunile de conductă înainte și după diafragme au fost drepte ; $l' = 10 \cdot D = 1000 \text{ mm}$ înainte de diafragmă și $l'' = 20 \cdot D = 2000 \text{ mm}$ după diafragme.

Dimensiunile constructive ale dispozitivului cu diafragmă necesare pentru măsurarea debitului de aer au fost:

- diametrul conductei	$D = 100 \text{ mm}$
- diametrul diafragmei principale	$d = 67 \text{ mm}$
= diametrul diafragmei suplimentare	$d' = 92 \text{ mm}$
- raportul $m = \frac{d^2}{D^2}$	$m = 0,45$

Determinarea debitului de aer prin dispozitivul cu diafragmă se face folosind relația :

$$m = 0,655 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot k_t \cdot d^2 \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P} \quad (4.2)$$

în care :

- α - este coeficientul de debit ; $\alpha = 0,7415$
- d - diametrul orificiului diafragmei principale, în m ;
- ρ - masa specifică a aerului în starea dinaintea diafragmei, în kg/m^3 ;
- ΔP - căderea de presiune în dispozitiv, în $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
- ϵ - factor de corecție pentru destindere ;
- k_t - factor de corecție ce ține seama de influența dilatării termice a diafragmei.

Deoarece, în această instalație, căderea de presiune măsurată la diafragmă, este destul de mică, se neglijează factorul de corecție pentru destindere ($\epsilon = 1$) ; de asemenea se neglijează și factorul de corecție care ține seama de dilatarea termică a materialului diafragmei și conductei ($k_t = 1$).

Pentru a cerceta influența umidității agentului de uscare asupra repartizării temperaturii și umidității semințelor de-a lungul stratului, instalația cuprinde umidificatorul (U), care în cadrul unui anumit regim de uscare, asigură menținerea constantă a unei anumite umidități a agentului de uscare prin pulverizare foarte fină a apei în aer, cu ajutorul pulverizatorului 5, care folosește apa din rezervorul 6 și aerul trimis cu un debit constant și bine stabilit de către compresorul 7.

În cadrul instalației construite, este necesară măsurarea temperaturii agentului de uscare și a semințelor în strat la diferite nivele. După cum este cunoscut, cel mai potrivit instrument pentru măsurarea temperaturii, într-un anumit loc, este termocuplul. Studiile întreprinse asupra măsurătorilor cu termocupluri, au arătat că, pentru temperaturi relativ mici, cel mai indicat este termocuplul cupru-

constantan, fapt ce a determinat să fie folosit și în această instalație.

Termocuplurile au fost confecționate din sîrmă de constantan cu diametrul de 0,40 mm și din sîrmă de cupru cu diametrul de 0,45 mm. Lipiturile au fost făcute prin sudare oxiacetilenică iar diametrul lipiturii nu a întrecut suma diametrelor sîrmelor. Sîrmele au fost izolate atît între ele, cît și de restul instalației, prin introducerea lor în tuburi subțiri de material plastic. Toate termocuplurile au aceeași lungime și au fost verificate împreună cu galvanometrul de lucru. Schema de conectare a galvanometrului și a comutatorului la termocupluri este prezentată în figura 4.5 .

Pentru verificarea experimentală a relației (3.51) instalația construită cuprinde o cameră de uscare (C) de formă prismatică (fig. 4.7), cu dimensiunile de 25x25x50 cm, cu fundul din sită cu dimensiunile ochiurilor de 3 x 3 mm. La diferite nivele (din zece în zece cm) pe axa stratului de semințe se introduce (în mijlocul unui bob), lipitura caldă a unui termocuplu, pentru a măsura temperatura boabelor. Lîngă bobul în care s-a introdus termocuplul, se plasează la același nivel, lipitura caldă a altui termocuplu, pentru a măsura temperatura agentului de uscare din jurul bobului. Lipiturile reci ale termocuplurilor sînt menținute la temperatura de 0°C, prin introducerea lor într-un vas cu amestec de apă cu gheață (fig. 4.7). Toate termocuplurile se racordează printr-un comutator cu 12 canele la un galvanometru.

Pentru asigurarea uniformității curentului de aer la intrarea în stratul de semințe, în cotul ce urmează tronsonului Tr, s-au prevăzut niște șicane (s) a căror poziție s-a ales prin verificări repetate a uniformității vitezei

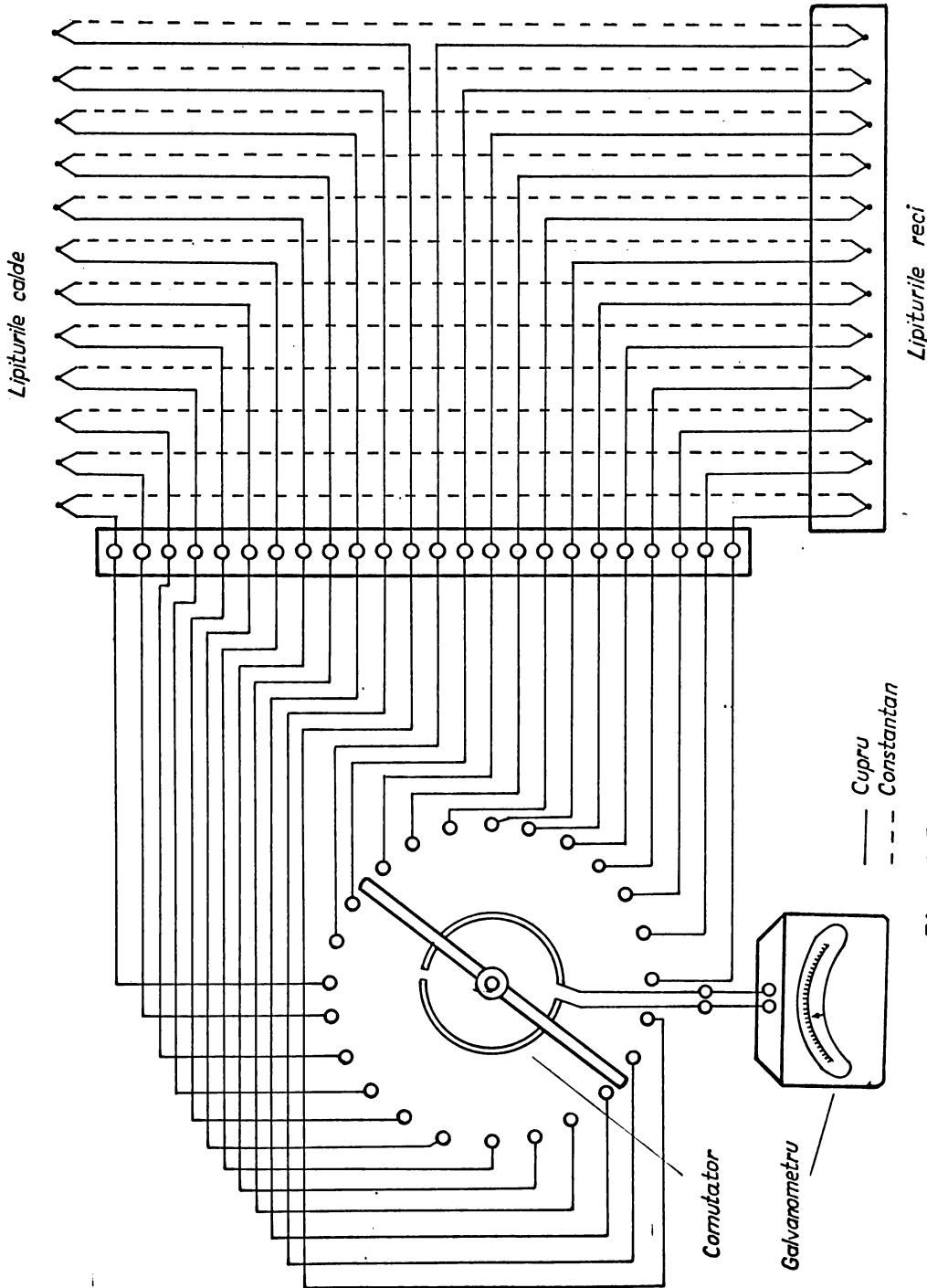


Fig. 4.5. Schema de conectare a termocuplurilor la galvanometru.

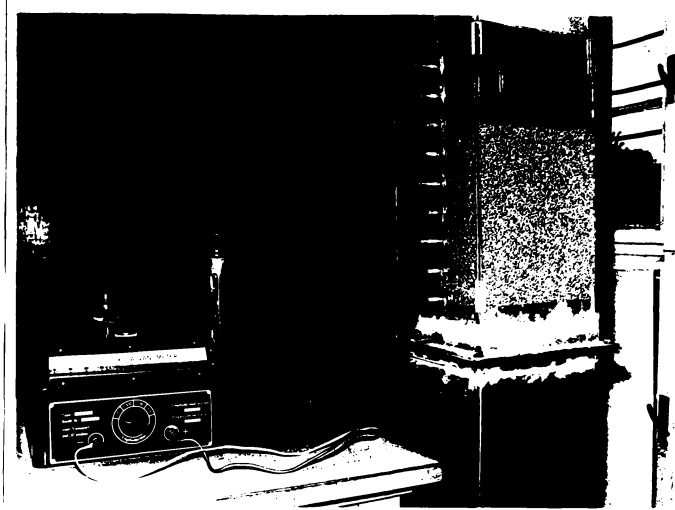


Fig. 4.7. Camera de uscare cu termocuplurile imersate și racordate la galvanometru.

în secțiunea de la baza stratului. Pentru același motiv, după difuzorul D, s-a prevăzut o porțiune de conductă dreptă (E) cu o lungime de 1,5 m.

În conducta de măsurare M în care s-a montat diafragma dublă, se găsește tronconul Tr, pe care se fixează termometrul cu contact 9 ce se găsește în circuitul releului termic 8, care conectează sau deconectează o parte din rezistențele de încălzire a aerului pentru menținerea constantă a temperaturii agentului de uscare (cu abateri de $0,2^{\circ}\text{C}$ în jurul valorii sta-

bilite), Tot pe tronsonul Tr se fixează termometrul uscat T și termometrul umed T' pentru măsurarea umidității relative a agentului de uscare (fig. 4.8). Două termometre și-

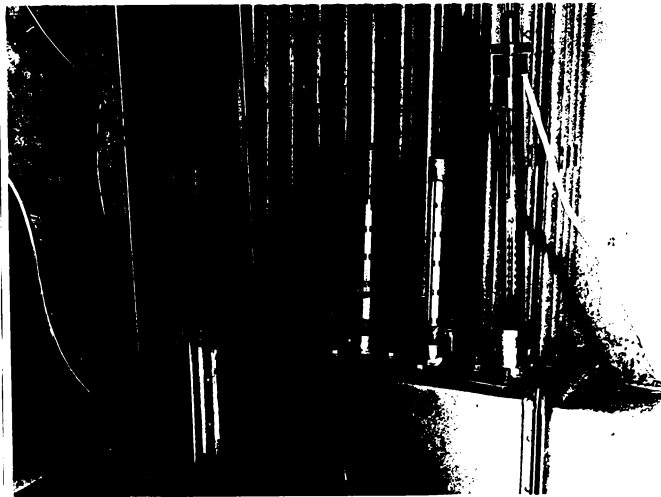


Fig. 4.8. Termometrele de măsurare și subărele de dirijare a agentului de uscare.

milare se introduc și în racordul de ieșire a agentului de uscare. Subărele lo și lo', folosesc pentru deschiderea, respectiv închiderea trecerii aerului până la intrarea în regim a instalației.

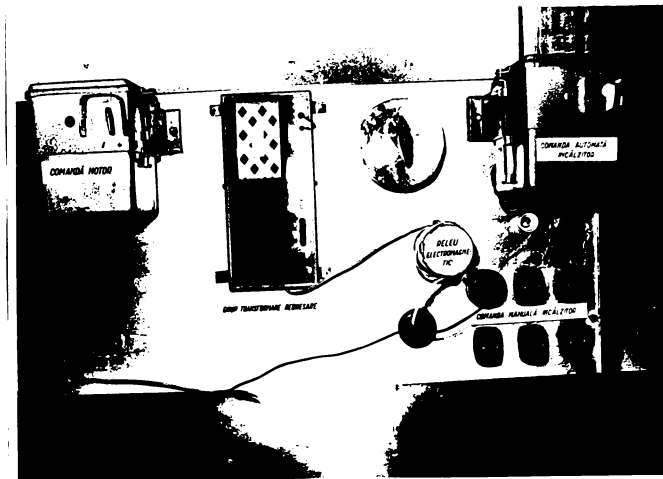


Fig. 4.9. Tabloul de comandă al instalației.

Comenzile necesare punerii în funcțiune (manual sau automat) a instalației, sînt centralizate la un tablou de comandă (fig. 4.9.) pe care s-au montat și o serie de dispozitive necesare întregii instalații.

4.2. Metoda de lucru

După ce se determină umiditatea inițială a semințelor, se introduc în camera de uscare. În boabele pregătite, se introduc termocupluri și apoi acestea se plasează în strat în centrul suprafețelor la nivelele stabilite. Lîngă bobul care conține termocuplul se plasează lipitura caldă a altui termocuplu.

Se închide complet șubărul lo' și se deschide șubărul lo atît cît este necesar pentru a crea o rezistență a curgerii aproximativ egală cu rezistența stratului de semințe.

Se pornește ventilatorul și se reglează debitul cu ajutorul clapetei 1 și al șubărului 2. Se conectează la rețea rezistențele electrice ale încălzitorului. După ce parametrii regimului de uscare au atins valoarea dorită și se mențin la această valoare oca 10 minute, se deschide complet șubărul lo' iar șubărul lo se închide.

La intervale regulate (pe toată perioada uscării) se citesc temperaturile indicate de termocupluri, precum și temperaturile indicate de termometrele T și T' din racordul de ieșire a agentului de uscare.

Pentru recoltarea probelor necesare determinării umidității, imediat după ce s-au citit temperaturile se înlătură capacul camerei de uscare și se introduce o sondă care ia probe de la nivelele dorite. Sonda are un diametru de 24 mm și poate lua probe din cinci în cinci cm pe înălțimea stratului. Pentru a lua probe de umiditate de

la baza stratului se introduce o altă sondă printr-un orificiu lateral creat în acest scop la partea de jos a camerei de uscare.

Pe parcursul încercărilor se țin sub observație indicațiile termometrelor (umed și uscat) din transonul Tr pentru a urmări constanța umidității relative a agentului de uscare.

Metoda de determinare a umidității semințelor este cea prin uscare la temperatura de 105°C [15]. Câteva grame de boabe se macină repede, cu ajutorul unei moriști de mână, prinzând șrotul direct într-un recipient mic ce se poate închide bine. Din acest recipient se scot imediat aproximativ 5 g de șrot, care se răspîndește în strat uniform într-o fiolă de cîntărire de sticlă tarată cu capac șlefuit (de aproximativ 5 cm diametru și 3 cm înălțime) cîntărită în prealabil la balanța analitică. Fiola încărcată cu proba, se acoperă cu capacul și se cîntărește la balanța analitică. Diferența reprezintă greutatea probei de uscat. Fiola de cîntărire, încărcată ca mai sus, se introduce apoi descoperită, împreună cu capacul său într-o etuvă încălzită la 105°C unde se ține 4 ore, măsurate din momentul cînd după introducerea temperatura fiolei a revenit la 105°C . La sfîrșit se acoperă repede fiola de sticlă cu capacul său, apoi se introduc într-un exicator cu clorura de calciu anhidră și se cîntărește îndată după ce s-a răcit pînă la temperatura camerei (după cca o oră).

Pierderea de greutate se exprimă procentual și se consideră ca umiditate totală a materialului.

$$U = \frac{G_0 - G}{G_0} \cdot 100$$

în care : U este umiditatea materialului, în % ;

Go - greutatea inițială a probei, în g ;

G - greutatea probei uscate, în g.

5. VERIFICARI EXPERIMENTALE SI ANALIZA REZULTATELOR

Cercetările experimentale efectuate cu ajutorul instalației prezentate la cap. 4, au drept scop de a verifica valabilitatea soluțiilor (3.50) și (3.51).

Au fost efectuate experiențe la șaisprezece regimuri de uscare, asemănătoare cu regimurile de uscare existente în instalațiile de uscat de tip industrial. Temperatura agentului de uscare a fost de 311 K și 315 K (38°C și 42°C), temperaturi utilizate în instalațiile de uscat semințe destinate semănatului. Umiditatea relativă a agentului de uscare a fost de 20 % și de 30 %, iar debitul agentului de uscare a fost de 0,045 kg/s și de 0,0234 kg/s. De asemeni grosimea stratului de semințe s-a ales de 30 cm și 15 cm, valori ce corespund cu grosimea stratului de semințe din instalațiile de uscat semințe existente în producție.

Experiențele au fost efectuate cu semințe de porumb proaspăt recoltate deci care au avut o umiditate naturală cuprinsă între 20 și 32 %. Nu s-a putut realiza ca la două sau mai multe regimuri de uscare să se utilizeze semințe cu aceeași umiditate inițială deoarece după cele cca 4 ore de uscare la un anumit regim, semințele din aceeași grămadă nu au mai avut aceeași umiditate. Metoda de umezire artificială a semințelor utilizată de alți autori nu a fost adoptată în experiențele proprii, considerînd că între formele de legare a apei cu semințele în mod natural și cea legată în mod artificial există diferențe ce ar putea produce interpretări greșite a rezultatelor experimentale.

În figurile (5.8 - 5.16) se prezintă curbele de variație a temperaturii semințelor, determinate experimental la trei nivele (0,05 ; 0,1 și 0,15 m) în stratul adânc de 0,15 m, iar în figurile 5.17 - 5.24, se prezintă curbele de variație a temperaturii semințelor, determinate experimental la trei nivele (0,1 ; 0,2 și 0,3 m) în stratul adânc de 0,3 m.

5.1. Legătura dintre studiul teoretic și rezultatele experimentale

Așa cum s-a precizat în cap. 3, pentru a verifica valabilitatea soluției (3.51) trebuie determinată experimental viteza de uscare din curbele de uscare. În acest scop în fig. 5.1 (sus), se prezintă curbele de uscare a semințelor de porumb a cărui umiditate inițială a fost de 24 % și care a fost uscat pînă la umiditatea de 18-20 % Temperatura aerului $\theta_0 = 311$ K, iar debitul de aer $G_a = 0,0254$ kg/s. Se constată că umiditatea semințelor de la un anumit nivel scade în raport cu timpul după o lege exponențială, tinzînd către valoarea de echilibru dinamic.

Curba cea mai de jos care reprezintă uscarea semințelor de la baza stratului, este analoagă cu o curbă de uscare a stratului subțire, adică micșorarea umidității se produce imediat după începerea uscării. În straturile superioare nu se produce uscarea în același mod. Așa-numitul front al uscării se deplasează în sus (în direcția de curgere a aerului), pe măsura trecerii timpului de uscare.

Pentru a reprezenta grafic variația în raport cu timpul a temperaturii semințelor, la nivelele de 0,1 ; 0,2 și 0,3 m, din curbele de uscare se determină viteza de uscare pentru diferite puncte de pe curbă, iar valorile obținute

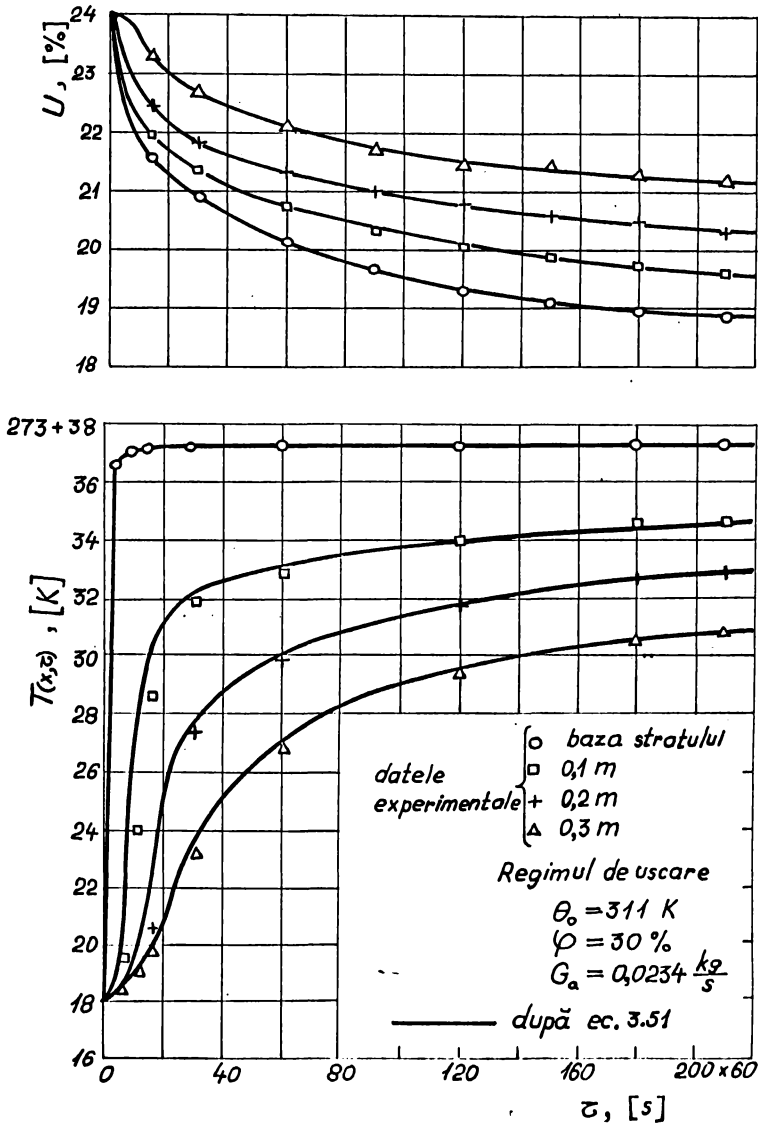


Fig. 5.1. Curbele de uscare (sus) și curbele de variație a temperaturii semințelor (jos) la patru nivele în stratul dens de porumb adânc de 0,3 m.

se introduc în soluția (3.51) obținându-se diferite valori ale temperaturii semințelor care reprezentate grafic dau curbele continui din fig. 5.1 (jos).

Temperatura semințelor la baza stratului crește imediat după începerea uscării. Temperatura în straturile următoare rămîne aproape constantă, pînă cînd frontul uscării a atins acea înălțime, după care temperatura are o creștere mai rapidă.

La regimurile de uscare corespunzătoare figurilor 5.17, 5.19, 5.21, 5.22, se constată că temperatura în straturile superioare descrește sau crește de la temperatura inițială a semințelor la temperatura de pseudosaturație imediat după începerea uscării și rămîne la această valoare pînă cînd frontul uscării atinge acea înălțime.

Fenomenul se întîlnește și la experiențele de uscare a stratului adînc de 0,15 m acolo unde umiditatea inițială a semințelor este mare, dar numai la curbele de temperatură corespunzătoare nivelului de 0,15 m (fig. 5.9, 5.11, 5.12 și 5.14). Explicația fenomenului este că în interiorul stratului de semințe și în special la nivelele superioare se produce condensarea vaporilor de apă transportați de aerul de uscare atunci cînd ajung la nivelele respective unde temperatura semințelor este scăzută. Condensul produs formează în jurul semințelor o peliculă de apă care îngreunează transmiterea căldurii de la aer la semințe și deci nu va permite ridicarea temperaturii semințelor.

În figura 5.2, se poate observa intervalul de timp cît semințele se găsesc la temperatura de pseudosaturație la un anumit nivel. Este tocmai intervalul de timp cît are loc evaporarea apei de la suprafața semințelor care a fost adusă din straturile inferioare și condensată pe semințe.

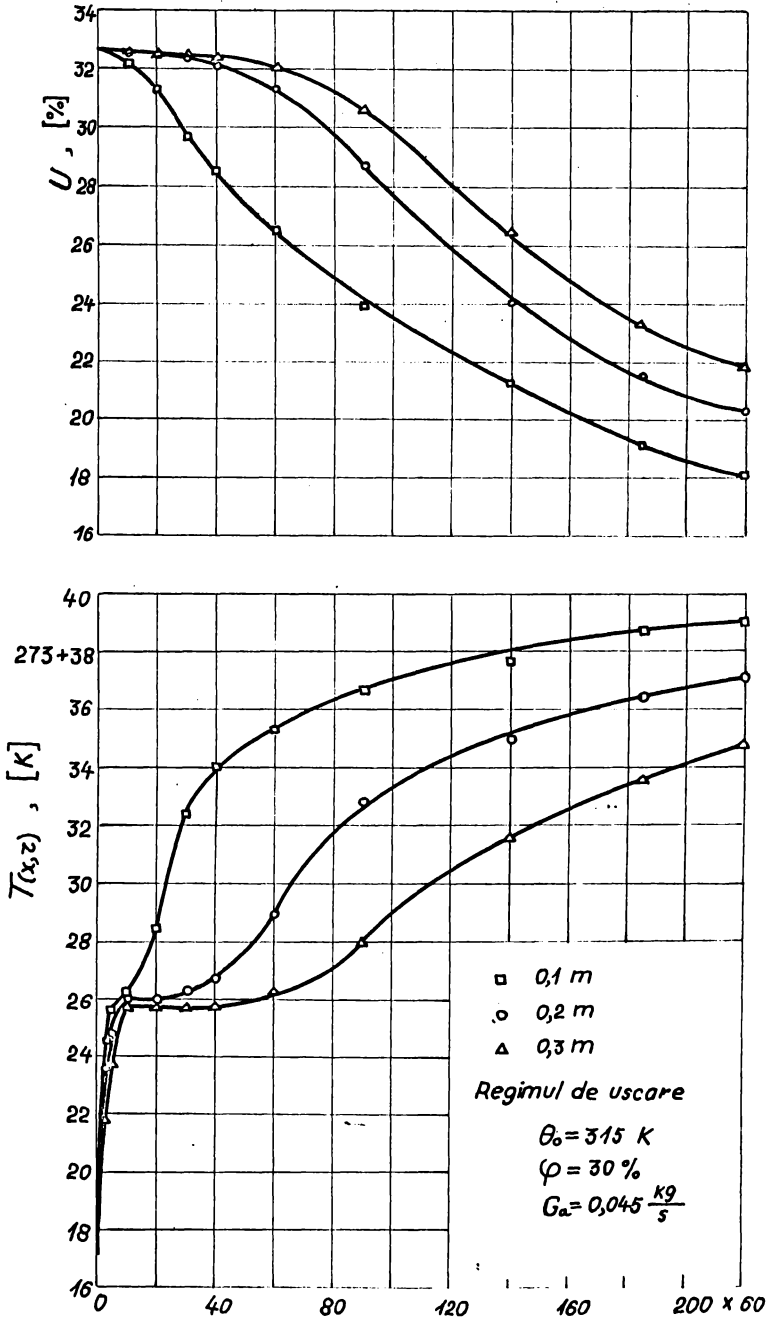


Fig. 5.2. Curbele de uscare (sus) și curbele de variație a temperaturii ridicate experimentale pentru un strat de porumb adânc de 0,3 m

La nivelele unde se constată menținerea temperaturii de pseudosaturație înseamnă că umiditatea existentă în semințe (sub pericarp) nu este îndepărtată. În aceste zone are loc evaporarea umidității de la suprafața semințelor care a fost adusă din straturile inferioare și care s-a condensat. Deci viteza de uscare în aceste puncte este constantă și egală cu viteza de evaporare a lichidului de pe suprafața liberă în condițiile de temperatură, umiditate și viteză ale aerului existente la acele nivele.

În figura 5.3, se prezintă curbele de variație a temperaturii bobului și a temperaturii aerului din jurul bobului, la înălțimea de 0,2 m. Se observă că pe toată perioada

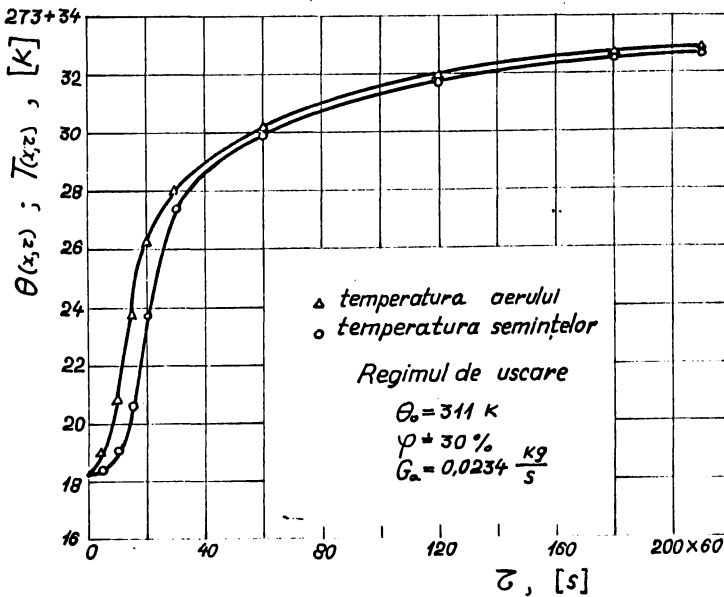


Fig. 5.3. Variația temperaturii aerului și a temperaturii semințelor în strat

uscării temperatura aerului este superioară temperaturii semințelor. La începutul procesului, temperatura aerului este mult mai mare decât temperatura bobului. Pe măsura trecerii timpului de uscare, diferența se micșorează tinzând către zero. Așa cum arată soluțiile (3.50) și (3.51), temperatura

aerului este mai mare ca temperatura semințelor cu cantitatea

$$C.m. (1 - e^{-\frac{C}{B}}) + (\theta_0 - T_0) \cdot (e^{\frac{X}{A} - \frac{C}{B}} - 2 \cdot e^{-\frac{C}{B}})$$

în alcătuirea căreia intră viteza de uscare și diferența $(\theta_0 - T_0)$. Cum atît viteza de uscare cît și diferența $(\theta_0 - T_0)$ au la început valori mari, iar apoi din ce în ce mai mici, este explicabil ca și diferența de temperatură să se micșoreze pe măsura creșterii timpului de uscare.

5.2. Influența umidității relative a aerului asupra variației temperaturii somintelor

Din soluția (3.54) se observă că prin existența în expresia acesteia a umidității de echilibru U_e , variația temperaturii semințelor depinde și de valoarea umidității relative a aerului care condiționează umiditatea de echilibru. Prin creșterea umidității relative a aerului de uscare pentru o anumită temperatură a acestuia, umiditatea de echilibru scade. Conform soluției (3.54) această are ca efect o creștere a temperaturii semințelor. Acest lucru este confirmat și de verificările experimentale așa cum se vede din figura 5.4, pentru adîncimea stratului de 0,3 m.

Acest fenomen este explicabil prin aceea că la o umiditate relativă mare a aerului de uscare capacitatea acestuia de a absorbi vapori de apă de la suprafața semințelor este mică, deci căldura cedată de către aer este folosită mai puțin pentru evaporarea umidității ci mai mult pentru încălzirea semințelor, fapt care face ca temperatura acestora să crească mai repede.

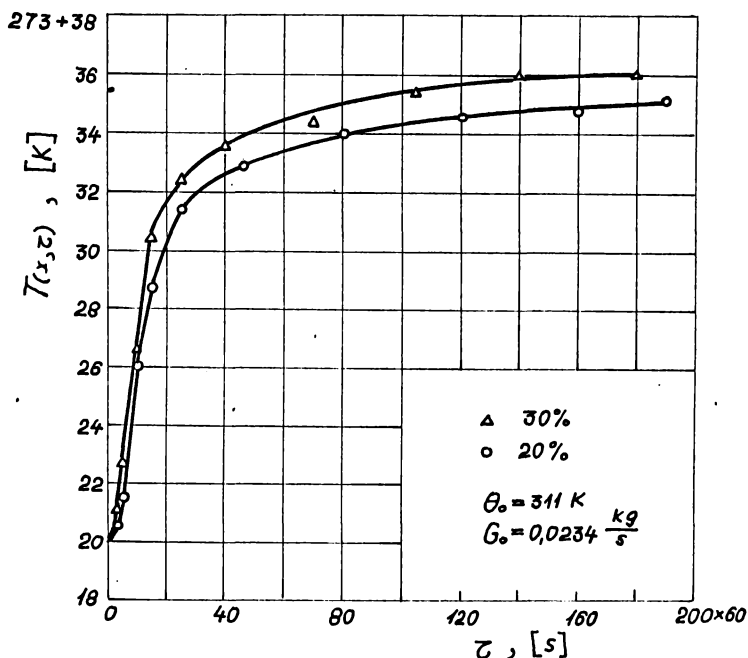


Fig. 5.4. Efectul umidității relative a aerului asupra variației temperaturii semințelor

5.3. Influența debitului de aer asupra variației temperaturii semințelor

Efectul debitului aerului de uscare asupra creșterii temperaturii semințelor, este prezentat în figura 5.5.

Se constată că la debite de 0,045 kg/s, variația temperaturii semințelor este mai pronunțată decât la debite de 0,0234 kg/s. La valori superioare ale debitului de aer, crește fluxul termic transmis semințelor, fapt ce va produce variația mai rapidă a temperaturii semințelor.

Prin creșterea debitului de aer, crește cantitatea de umiditate transportată de aer, deci crește și viteza de uscare. La prima vedere, conform soluției (3.51) aceasta înseamnă creșterea termenilor trei și patru. Prin crește-

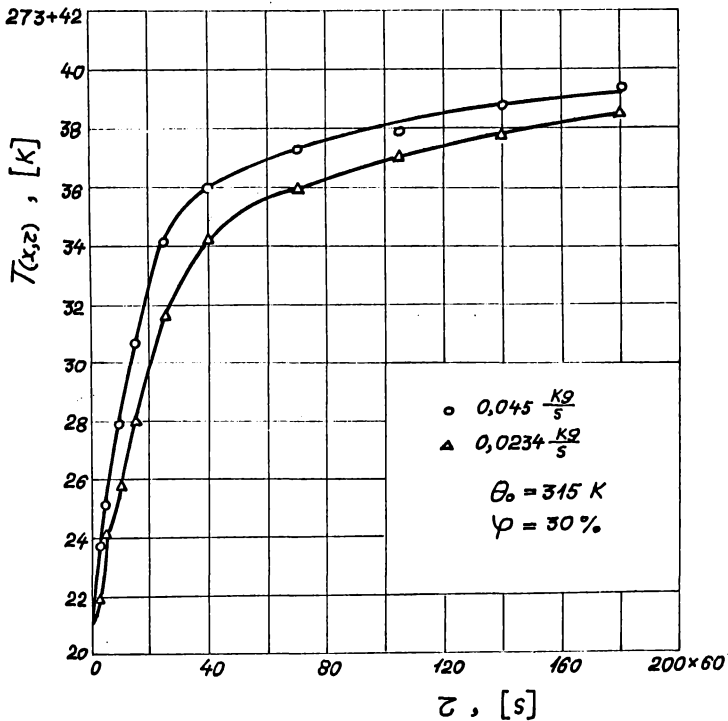


Fig. 5.5. Efectul debitului de aer asupra variației temperaturii semințelor.

rea debitului de aer crește și transmisivitatea termică care are ca prim efect micșorarea diferențiată a constantelor A și C. In ansamblu, prin creșterea debitului de aer se produce o micșorare a termenului doi încât variația temperaturii semințelor este mai pronunțată. In acest fel, valoarea funcției $T(x, \tau)$ într-un anumit punct din strat și la un anumit timp va fi mai mare pentru debite de $0,045 \text{ kg/s}$ decât pentru $0,0234 \text{ kg/s}$.

5.4. Influența temperaturii aerului asupra variației temperaturii semințelor

Influența temperaturii inițiale a agentului de uscare este prezentată în figura 5.6, pentru adâncimea stratului de $0,3 \text{ m}$, iar în figura 5.7 pentru adâncimea de $0,15 \text{ m}$.

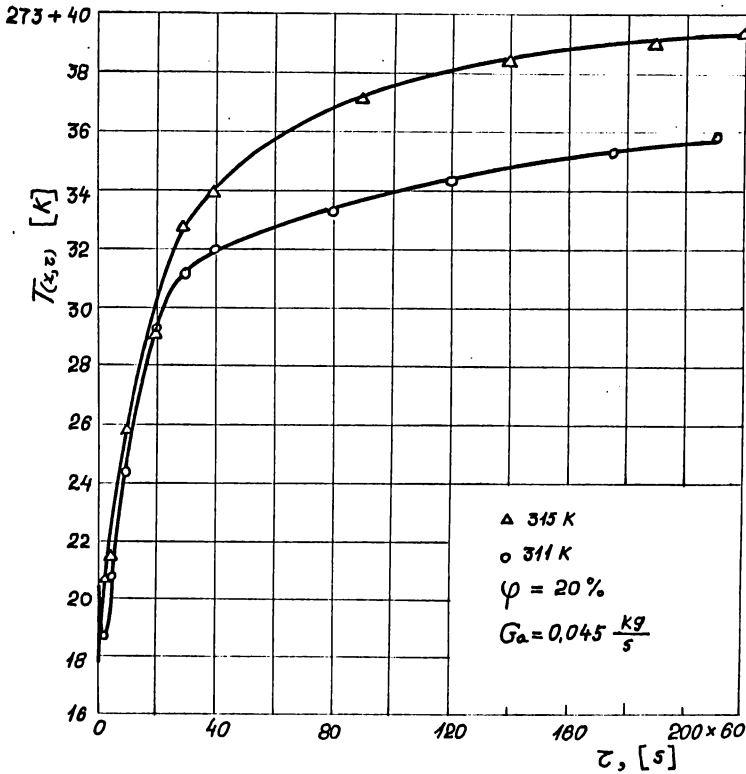


Fig. 5.6. Efectul temperaturii aerului asupra variației temperaturii semințelor pentru stratul adânc de 0,3 m

Se constată că la valori mari a temperaturii agentului de uscare variația în timp a temperaturii semințelor este mai mare. Acest lucru este explicat prin aceea că la temperaturi ridicate a aerului de uscare (dar aceeași umiditate relativă), crește atât fluxul de căldură luat de semințe pentru evaporarea umidității cât și fluxul de căldură convenit încălzirii semințelor fapt ce va produce o creștere mai rapidă a temperaturii acestora. Din grafic se observă că diferența dintre curbele de temperatură nu este exact 4 grade atât cât este diferența dintre temperatura agentului de uscare la baza stratului, ci mai mică,

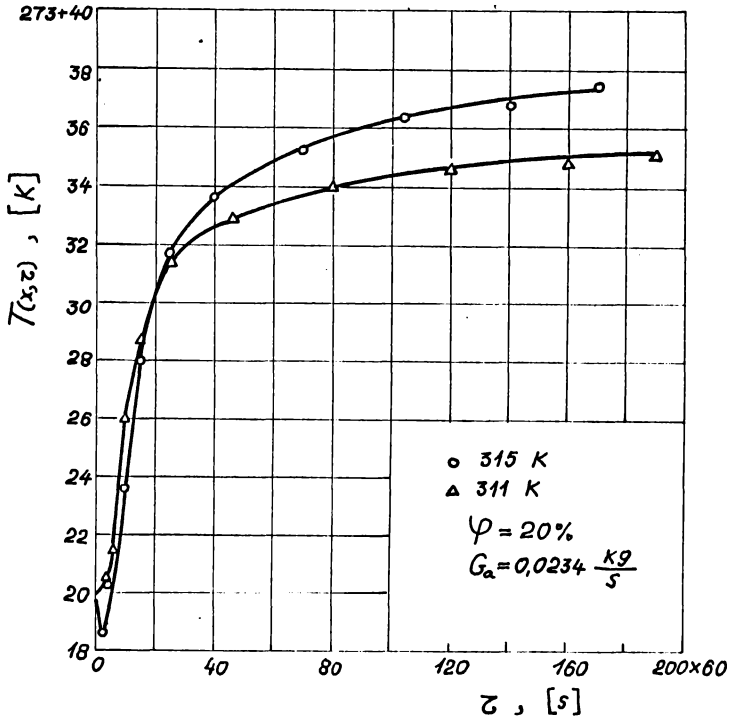


Fig. 5.7. Efectul temperaturii aerului asupra variației temperaturii semințelor pentru stratul de 0,15 m

fapt ce arată că o parte din căldura cedată de către aer este folosită și pentru mărirea vitezei de uscare. Soluția (3.51) explică acest lucru prin faptul că, creșterea temperaturii aerului are corespondență directă asupra creșterii lui $T(x, z)$.

5.5. Exemplu de calcul

Pentru a ilustra modul de utilizare a soluției (3.51), se va efectua calculul necesar găsirii temperaturii semințelor într-un anumit nivel, la un anumit timp în stratul de semințe, așa cum s-a procedat pentru a găsi curbele teoretice de variație a temperaturii din fig. 5.1.

Valorile mărimilor fizice utilizate în prezentul exemplu sînt :

- căldura masică a aerului, $c_a = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;
- căldura masică a unui bob umed, $c_m = 1920 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;
- căldura latentă masică de vaporizare,
 $l_v = 226 \cdot 10^4 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$;
- masa volumică a aerului, $\rho_a = 1,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;
- masa volumică a unui bob umed, $\rho_m = 1320 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;
- masa volumică a unui bob uscat, $\rho_o = 1280 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;
- transmisivitatea termică, $\alpha = 37 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$;
- volumul unui bob, $v_m = 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$;
- aria unui bob, $a_m = 0,256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$;
- fracția de gol $\xi = 0,377$;
- debitul aerului de uscare, $G_a = 0,045 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$;
- aria bazei stratului, $S = 0,0625 \text{ m}^2$.

Constantele A_1 , A , B și C , vor avea valorile

$$A_1 = 390 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

$$A = 0,051 \text{ m}$$

$$B = 109 \text{ s}$$

$$C = 12000 \text{ K} \cdot \text{s}$$

Dacă prin stratul dens de semințe a cărui temperatură inițială $T_0 = 291 \text{ K}$ (18°C), se suflă aer cald cu temperatura $\theta_0 = 311 \text{ K}$ (38°C), atunci după un timp de uscare

$\tau = 3600 \text{ s}$, la nivelul $x = 0,2 \text{ m}$, viteza de uscare determinată din curba de uscare (fig. 5.1 sus) este :

$$m = \text{tg } \varphi_n \cdot \frac{\lambda_u}{\lambda_\tau}$$

unde

λ_u este scara umidității ; $\lambda_u = 0,1$ (1 mm = 0,1 %)

λ_τ - scara timpului ; $\lambda_\tau = 120$ (1 mm = 120 s)

φ_n - unghiul format de tangenta la curba de uscare în punctul dorit (a se vedea pag. 67)

$$\text{Deci } m = 0,166 \frac{0,1}{120} = 0,139 \cdot 10^{-3} \frac{\%}{\text{s}}$$

In acest caz temperatura semințelor la nivelul
 $x = 0,2$ m după $\tau = 3000$ s va fi :

$$\begin{aligned} T(x, \tau) &= 311 - 12 \cdot 10^3 \cdot 0,139 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{0,2}{0,051} - \right. \\ &\quad \left. - e^{-\frac{0,2}{0,051} - \frac{3600}{109}} \right) - (311 - 291) \cdot e^{-\frac{3600}{109}} = \\ &= 303 \text{ K} = 30^\circ\text{C} \end{aligned}$$

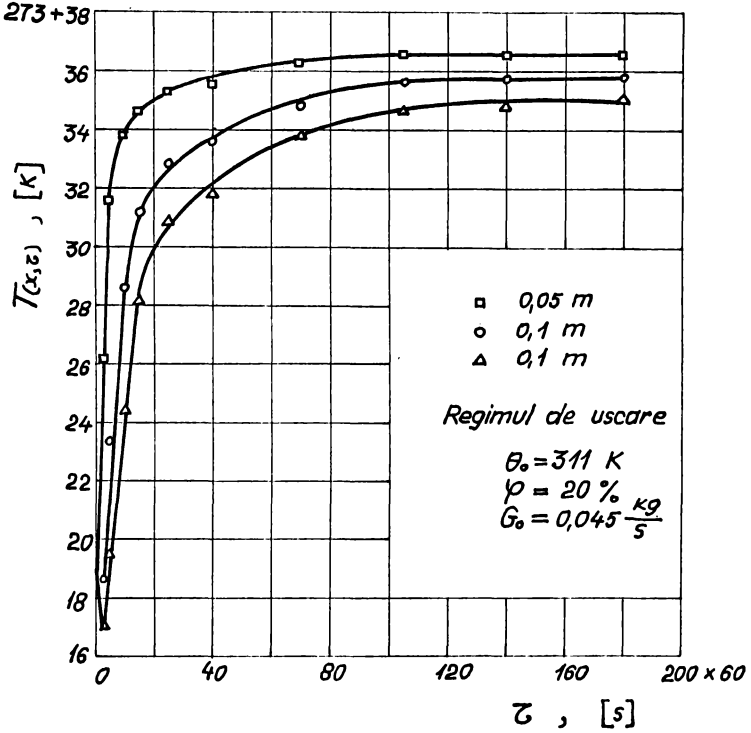


Fig. 5.8

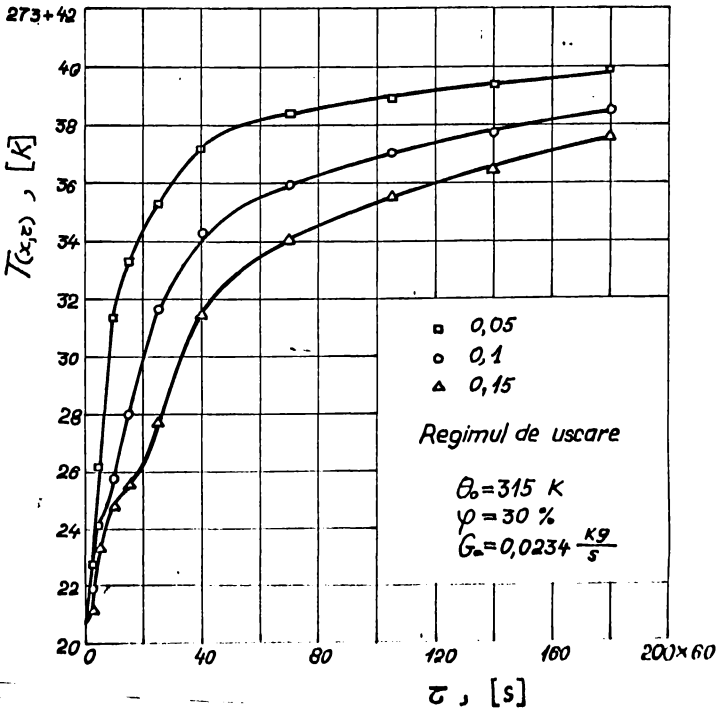


Fig. 5.9

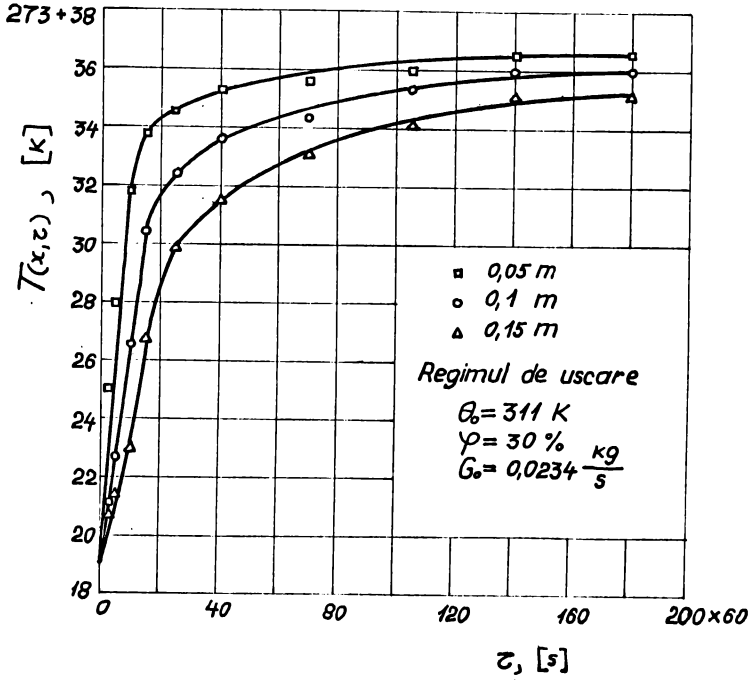


Fig. 5.10

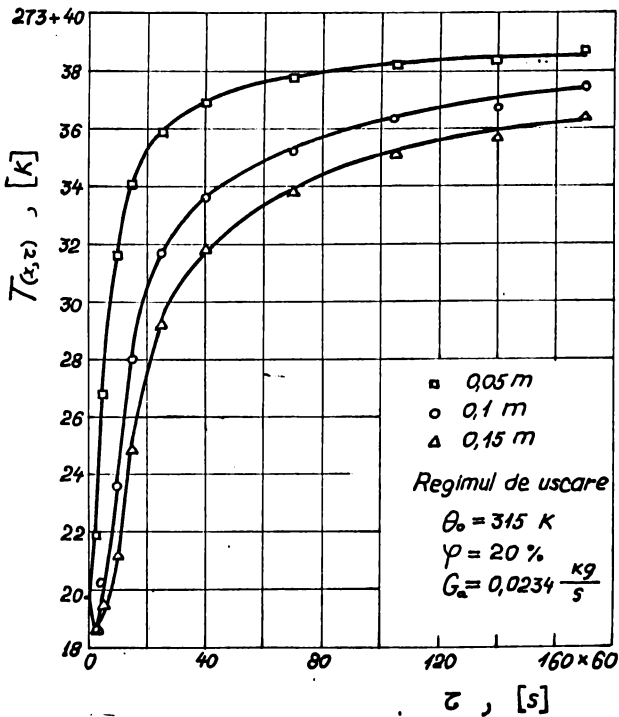


Fig. 5.11

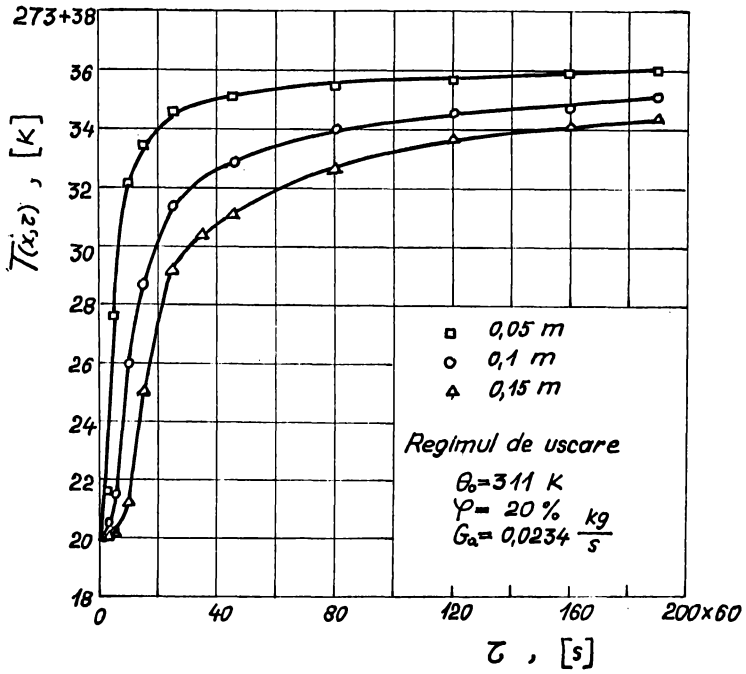


Fig. 5.12

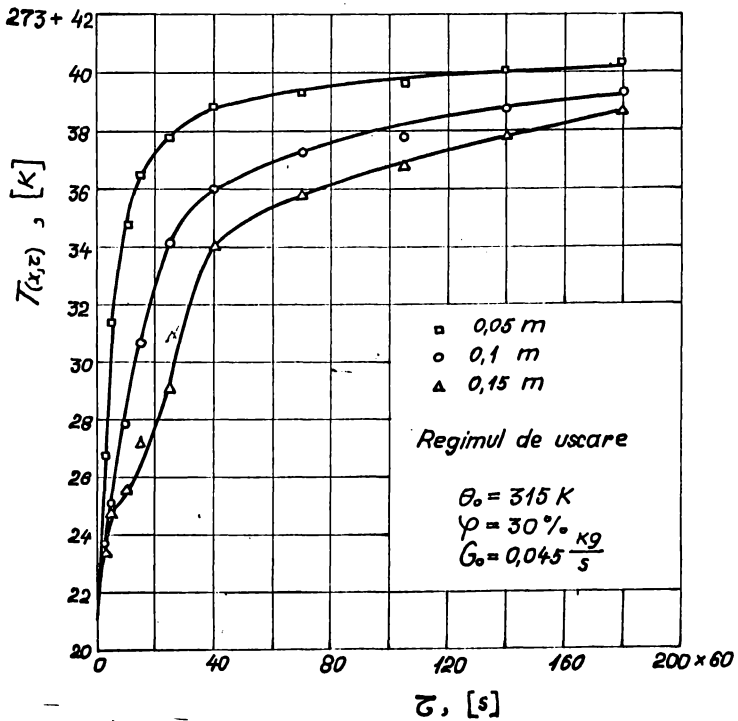


Fig. 5.14

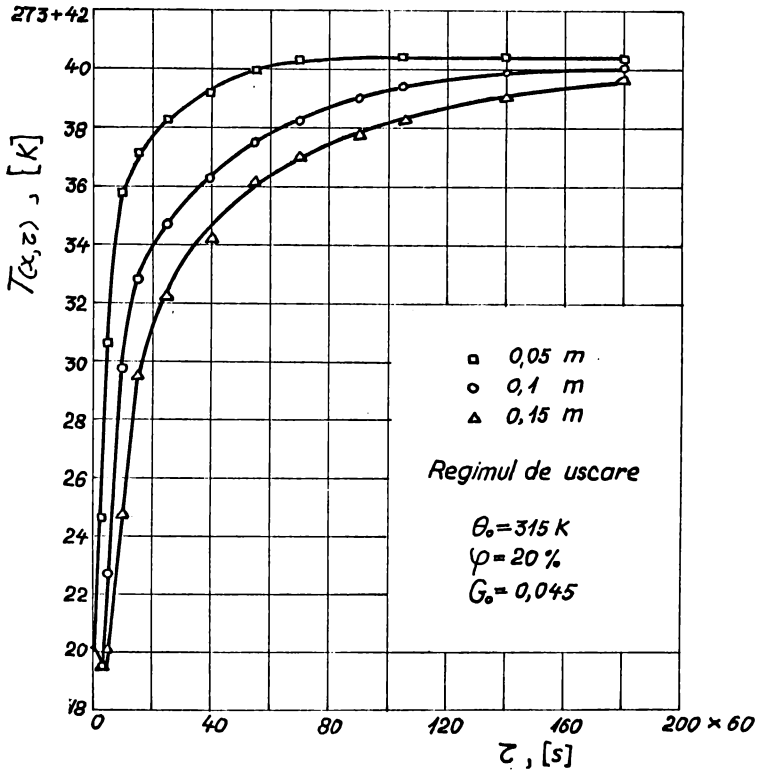


Fig. 5.15

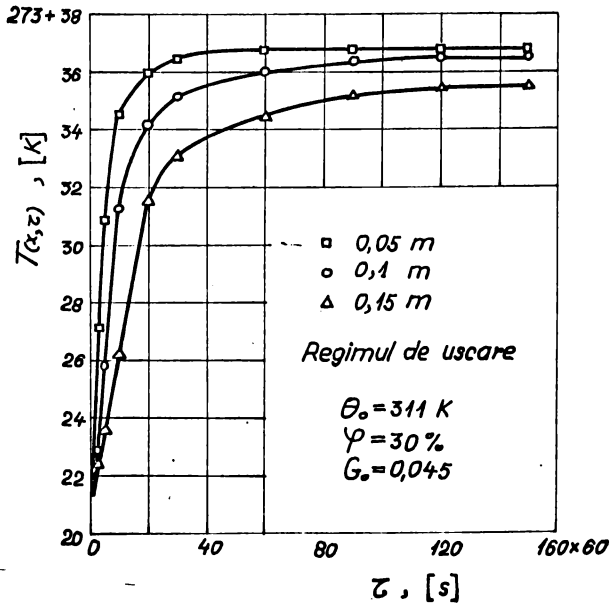


Fig. 5.16

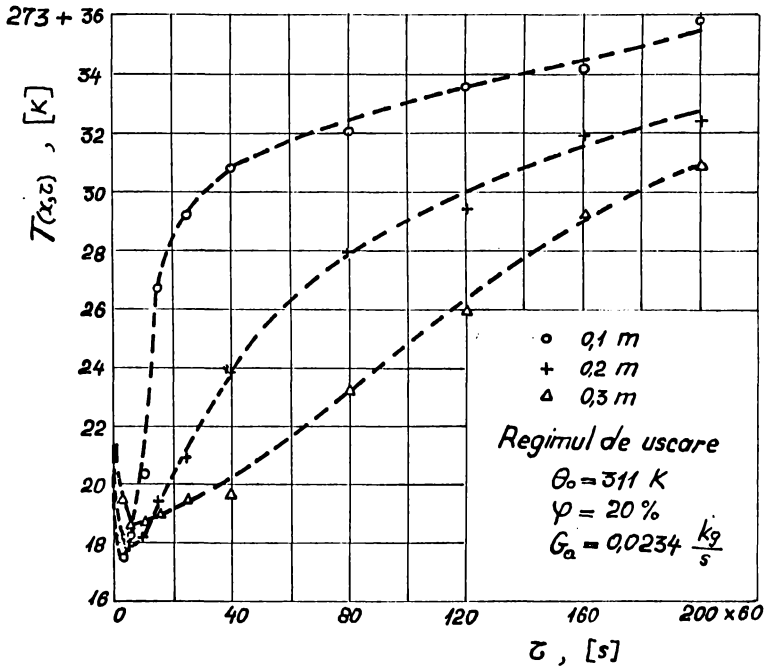


Fig. 5.17

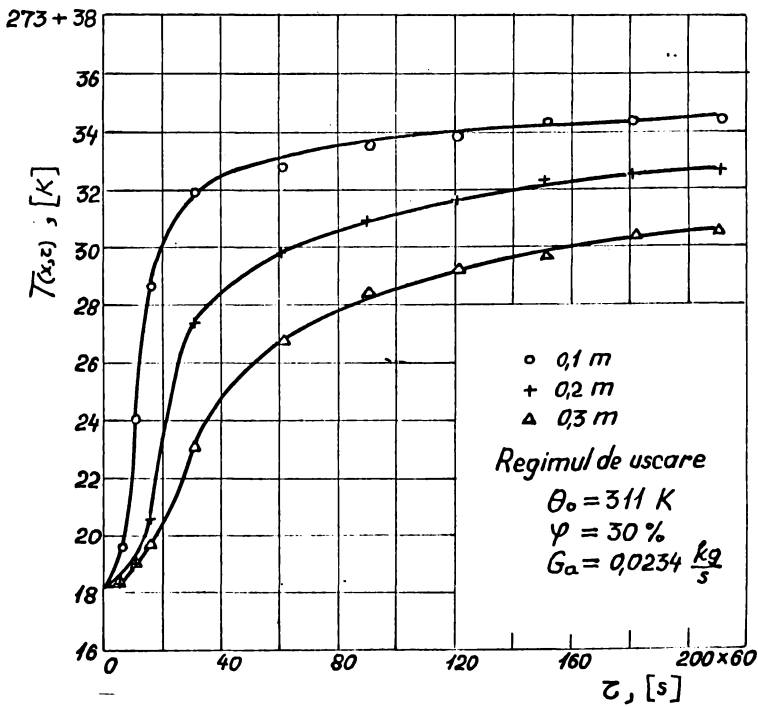


Fig. 5.18

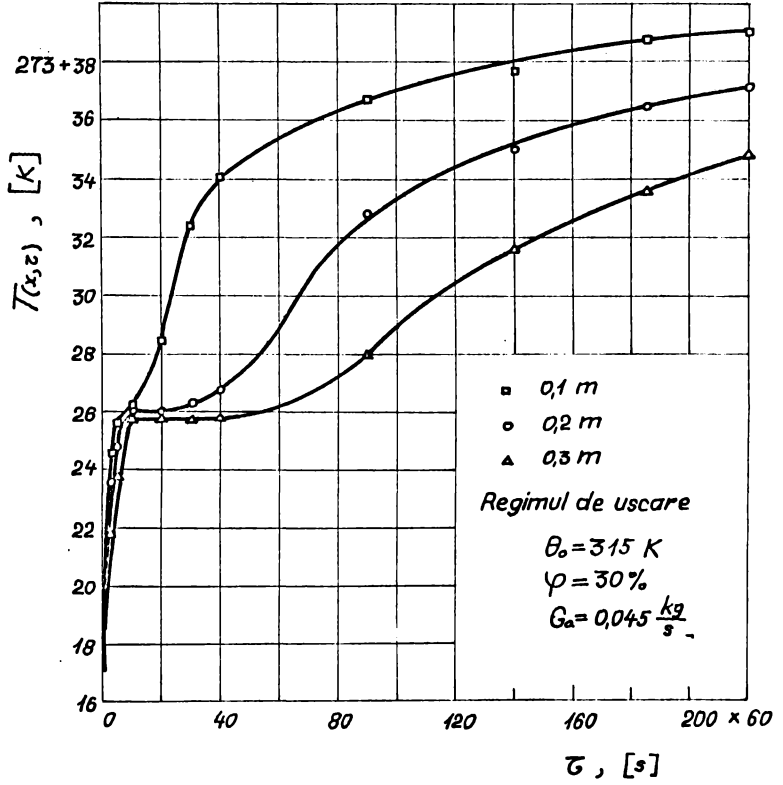
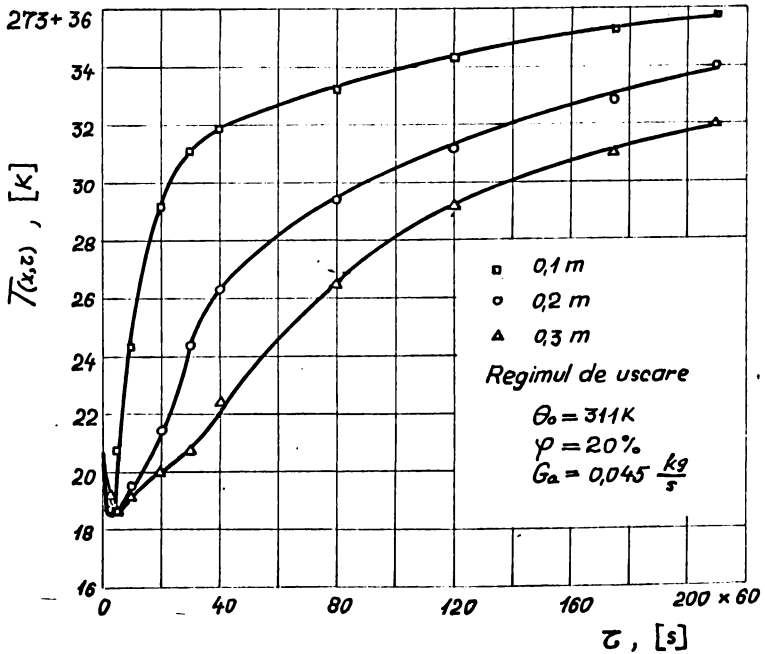


Fig. 5.19



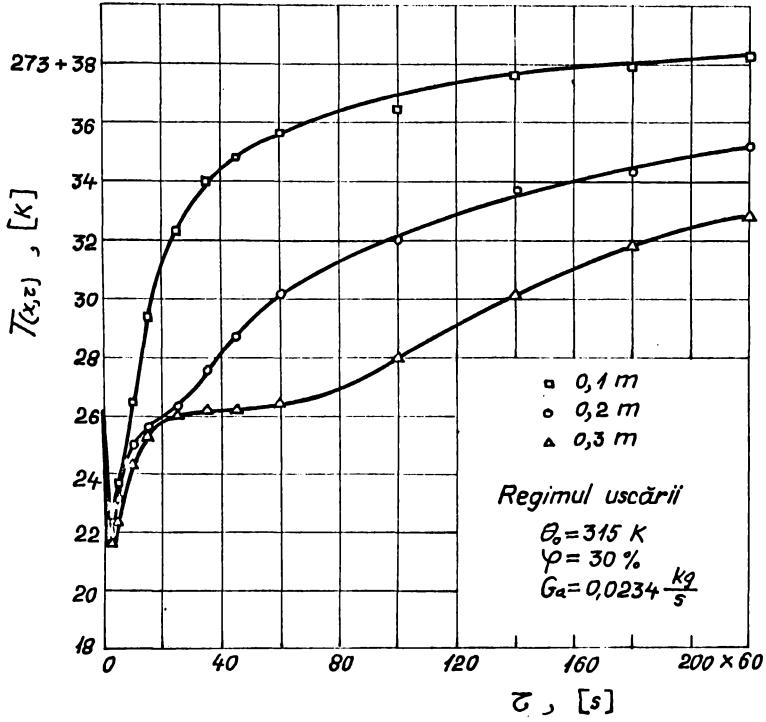


Fig. 5.21

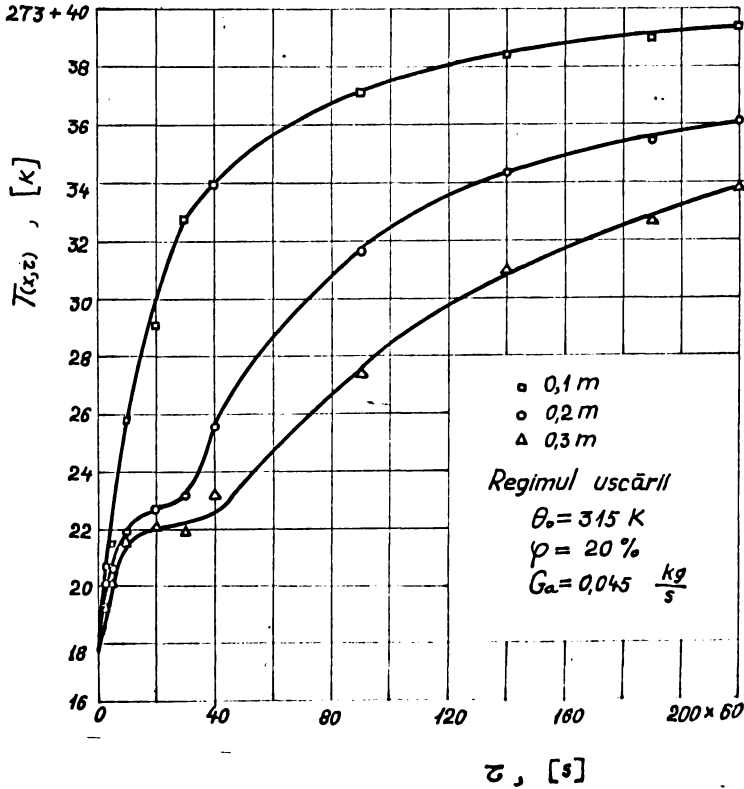


Fig. 5.22

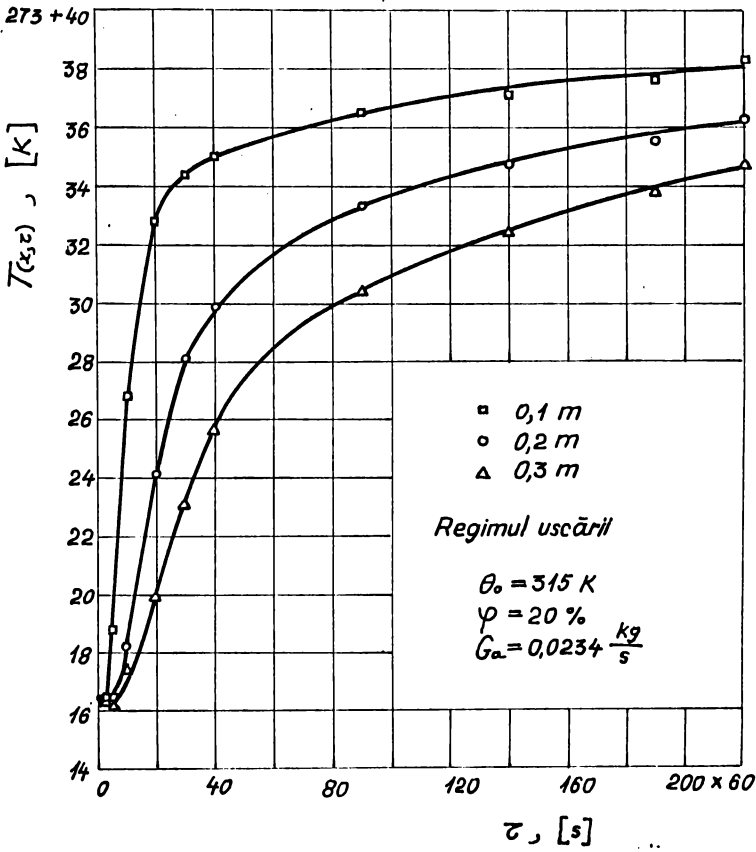


Fig. 5.23

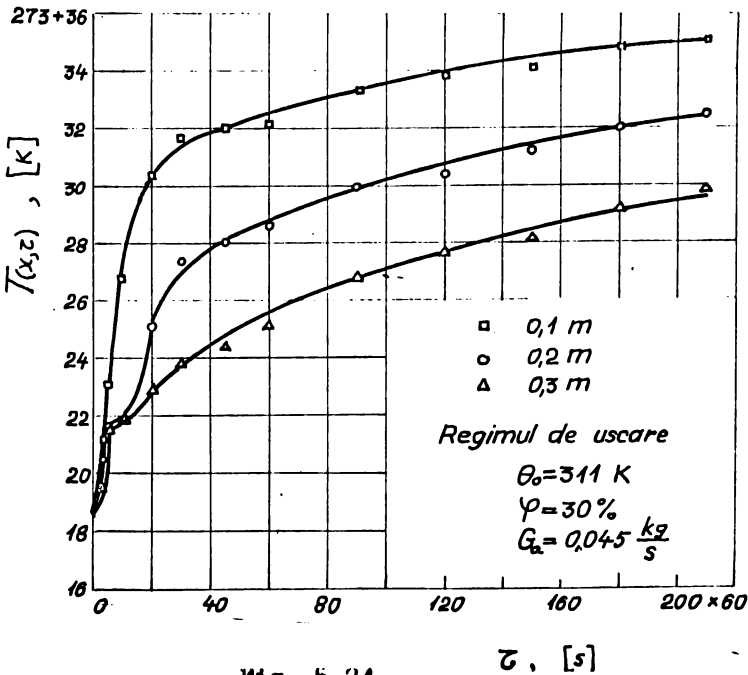


Fig. 5.24

6. C O N C L U Z I I

6.1. Considerații finale

Deși s-au întreprins pînă în prezent cercetări valoroase și interesante asupra fenomenelor ce apar în instalațiile de uscat semințe, mai sînt totuși numeroase probleme de parte de a fi soluționate corespunzător.

Fiecare din cercetările efectuate explică ceva din conceptul uscării într-un domeniu limitat, dar nu s-a stabilit pînă în prezent o teorie universal valabilă. Unele cercetări, cum ar fi cele ale uscării semințelor în strat subțire se bazează pe presupuneri nu prea corespunzătoare pentru studiul uscării boabelor, astfel încît aplicarea acestora în practică, pare nejustificată.

Din studiul teoretic și experimental al repartizării temperaturii în funcție de timp de-a lungul unui strat dens de semințe supus uscării convective cu aer cald, s-au desprins o serie de concluzii și observații interesante, dintre care în cele ce urmează sînt redată pe scurt cele mai importante.

1. La deducerea ecuației care descrie temperatura semințelor trebuie luată în considerare în mod separat căldura utilizată pentru încălzirea semințelor și cea utilizată pentru evaporarea umidității.

2. Pentru găsirea legilor de repartizare a temperaturii semințelor și a aerului de-a lungul stratului, se introduc unele ipoteze simplificatoare care ușurează calculul analitic și care pentru scopuri practice nu reprezintă inconveniente prea mari.

3. Rezolvarea sistemului de ecuații cu derivate parțiale format din ecuația ce descrie temperatura semințelor și

din ecuația care descrie temperatura aerului, se efectuează cel mai convenabil prin metoda calculului operațional utilizând transformarea Laplace.

4. Cele două soluții ale sistemului reprezintă legile de repartizare în raport cu timpul a temperaturii semințelor respectiv a aerului de-a lungul unui strat dens de semințe prin care se suflă aer cald.

5. Legile de repartizare a temperaturii semințelor și a aerului de-a lungul stratului sînt influențate de viteza de uscare a semințelor care pentru un anumit nivel din strat are o dependență exponențială față de timp.

6. Deoarece literatura de specialitate nu dispune în prezent de o metodă analitică general valabilă pentru a determina viteza de uscare, este necesar ca aceasta să se determine experimental pentru a verifica valabilitatea legii de repartizare a temperaturii de-a lungul stratului.

7. Viteza de uscare a fost determinată din curbele de uscare care au fost trasate pentru un strat dens de semințe de porumb adînc de 0,3 m ; introducerea valorilor vitezei de uscare în relația ce exprimă legea de repartizare a temperaturii și reprezentarea grafică a acesteia confirmă justetea legii stabilite.

8. Pentru scopuri practice, adică pentru un timp de uscare mare, așa cum se întîmplă în instalațiile de uscare din producție, legea teoretică de repartizare a temperaturii semințelor de-a lungul stratului este pe deplin verificată de rezultatele experimentale.

9. Rezultatele calculului teoretic sînt apropiate de valorile măsurate ale temperaturii. Diferențele dintre valorile măsurate și cele calculate se datoresc următoarelor :

- calculului unidimensional ;
- erori la măsurarea umidității semințelor, precum și la determinarea grafică a vitezei de uscare în special pentru începutul uscării ;

- ipotezelor simplificatoare .

10. Experiențele de uscare efectuate asupra unui strat de 0,3 m, la opt regimuri de uscare diferite, precum și la uscarea unui strat de 0,15 m la aceleași regimuri, au dovedit o bună concordanță a studiului teoretic cu determinările experimentale.

11. După cum se constată din fig. 5.1 și anexele 1-16, temperatura semințelor de la baza stratului variază rapid de la temperatura T_0 la temperatura θ_0 pe care o are aerul la intrarea în strat.

12. Diferența dintre temperatura aerului și a semințelor este cuprinsă între 0,2 și 4 grade. Valori superioare corespund umidității inițiale ridicate dar numai pentru nivelele de 0,05 m și 0,1 m în stratul de 0,15 m grosime și pentru nivelele de 0,1 m și 0,2 m în stratul de 0,3 m grosime. În aceste cazuri diferența este mare după momentul când temperatura semințelor depășește temperatura de pseudo-saturație.

13. După un timp de uscare mare la toate regimurile și la toate nivelele temperatura semințelor este foarte apropiată de temperatura aerului, încît valoarea temperaturii aerului din spațiul intergranular poate fi considerată drept temperatura semințelor.

14. Influența pe care o au parametrii regimului de uscare asupra variației temperaturii în raport cu timpul de-a lungul stratului de semințe, este justificată atât teoretic cît și experimental prin legătura acestor parametrii

cu alte fenomene fizice bine cunoscute.

15. Expresiile (3.50) și (3.51) pot fi utilizate cu succes în industria chimică la studierea repartizării temperaturii de-a lungul unui strat de orice alt fel de material granular supus uscării cu aer cald.

6.2. Contribuții personale

În cele ce urmează sînt prezentate principalele contribuții personale la studiul repartizării temperaturii de-a lungul unui strat de semințe care se usucă cu aer cald.

1. Deducerea ecuațiilor care descriu temperatura semințelor și temperatura aerului de uscare.

2. Elaborarea unei metode de rezolvare a sistemului de ecuații stabilit, bazată pe calculul operațional, din care s-a obținut legea de repartizare în raport cu timpul a temperaturii semințelor de-a lungul unui strat adînc de semințe prin care trece aerul cald.

3. Realizarea unei instalații experimentale pentru cercetări multiple în domeniul uscării semințelor, care oferă posibilitatea varierii parametrilor regimului de uscare.

4. Efectuarea unui mare număr de experiențe cu grosimi ale stratului de semințe și cu regimuri de uscare similare cu cele existente în instalațiile de uscat din producție.

5. Verificarea experimentală a legii teoretice de repartizare a temperaturii semințelor de-a lungul unui strat adînc de semințe prin care se suflă aer cald.

6. Indicarea influenței parametrilor regimului de uscare asupra curbei de variație a temperaturii semințelor.

7. Indicarea unei metode rapide de determinare a temperaturii în masa de semințe la un anumit nivel atunci cînd se cunoaște viteza de uscare la nivelul respectiv.

B I B L I O G R A F I E

1. ALLEN, J.R. "Application of grain drying theory to the drying of maize and rice". J. agric. Engng. Res. 1960, vol. 4, nr. 5, p. 363.
2. ANDRE, ANGO "Complemente de matematici pentru inginerii din electrotehnică și din telecomunicații". Traducere din lb. franceză, Editura tehnică, București, 1965.
3. BAKKER-ARKEMA, F.W.
BICKERT, W.G.,
PATTERSON, R.J. "Simultaneous heat and mass transfer during the cooking of a deep bed of biological product under varying inlet air conditions". J. agric. engng. res., vol. 12, nr.4, 1967, p. 297.
4. BOYCE, D.S. "Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying". J. agric. engng. res., vol. 10, nr. 4, 1965, p. 333.
5. BROWNE, D.A. "Variation of the Bulk Density of cereals with moisture content". J. agric. engng. res., vol.7, nr.4, 1962, p. 288.
6. BRUIN, S. "Calculation of temperature and moisture distributions during contact drying of a seet moist material". Int. J. heat Mass transfer, vol.12, nr.1, 1969, p. 45.
7. CHIN SHU CHEN,
JOHNSON, W.H. "Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials". I. Theoretical considerations of drying phenomena". Trans. A.S.A.E., vol. 12, nr.1, 1966, p. 109.
8. CHITTENDEN, D.H.,
HUSTRULID, A. "Determining drying constant for sheled corn". Trans. A.S.A.E., vol. 12, nr.9, 1966, p.52.
9. CLARK, R.G. "A instalation for crop drying research". J. agric. engng. res., vol. 11, nr.1, 1966, p. 58.
10. CLARK, R.G.,
LAMOND, W.J. "Drying wheat in two foot beds". I. Rate of drying. J. agric. engng.res. vol. 13, nr.2, 1968, p. 141.

11. CLARK, R.G.,
LAMOND, W.J. "Drying wheat in two foot beds". III. Exhaust air humidity. J. agric. engng. res., vol. 13, nr.4, 1965, p. 323.
12. COLEMAN, D.A.,
FELLOWS, H.C. "Hygroscopic moisture in general grains". Cereal chem., nr. 2, 1925, p. 275.
14. CRANK, J. "The mathematics of diffusion". Oxford University Press. New York, 1964.
15. DAVIDESCU, D. "Metode de analiză chimice și fizice folosite în agricultură". Ed. Academiei R.P.R., București, 1963.
16. DASCALESCU, A. "Uscarea și aplicațiile ei în industrie". Ed. Tehnică București, 1964.
17. GERJOI, A.P.,
SAMOCETOV, V.F. "Zernosușenie i zernosușilki". Izdatelstvo "Kolos", Moskva, 1967.
18. STOKA, M. "Culegere de probleme de funcții complexe". Ed. tehnică București, 1965.
19. GREIG, D.J. "The determination of the rate constant in thin layer drying of agricultural crops". J. agric. engng. res. vol. 15, nr. 2, 1970, p. 106.
20. HALL, C.W.,
RODRIGUEZ-ARIAS,
J.H. "Equilibrium moisture content of shelled corn". Agric. Engng. St. Joseph, Mich. 1958, vol. 39, nr.8, p. 466.
21. HAMBURGER, L. "Introducere în teoria propagării căldurii". I. Conducția prin solide. Edit. Acad. R.P.R., București, 1956.
22. HAMDY, M.Y.,
BARRE, H.J. "Evaluating film coefficient in single - kernel drying". Trans. A.S.A.E., vol. 12, nr. 2, 1969, p. 205.
23. HENDERSON, S.M. "A basic concept of equilibrium moisture". Agric. engng. St. Joseph, Mich., vol. 33, nr.1, 1952, p. 29.
24. HENDERSON, J.M.,
HENDERSON, S.M. "A computational procedure for deep-bed drying analysis". J. agric. engng. res. vol. 13, nr. 2, 1968, p. 87.
25. HENDERSON, S.M.,
PABIS, S. "Grain drying theory". IV. The effect of air flow rate on the drying index. J. agric. engng. res. vol.7, nr. 2, 1962, p. 85.

26. HENDERSON, S.M.,
PABIS, S. "Grain drying theory". I. Temperature effect on drying coefficient. J. agric. engng. res. vol. 6, nr.3, 1961, p. 169.
27. HENDERSON, S.M.,
PERRY, R.L. "Agricultural process engineering". John Wiley & Sons, New York, 1955.
28. HUSTRULID, A.,
FLIKE, A.M. "Theoretical drying curve for shelled corn". Trans. A.S.A.E., vol. 2, nr.1, 1959, p. 112.
29. IONESCU, D.V.,
KALIK, C. "Ecuatii diferențiale ordinare și cu derivate parțiale". Editura didactică și pedagogică, București, 1965.
30. IVANOV, N. Ia. "Mecanismul procesului de uscare". Mecanizarea agriculturii, I.D.T., nr. 24, 1966, p. 1375.
31. IVES, N.C.,
HUKIL, W.V.,
BLACK, H.M. "Corn - drying time at counter flow steady-state". Trans. A.S.A.E. vol. 11, nr. 2, 1968, p. 240.
32. JAMES, H.Y.,
WHITAKER, T.B. "Evaluation of the diffusion equation for describing thin - layer drying of peanuts in the hull". Trans. A.S.A.E., vol. 14, nr.2, p. 309.
33. KOSUBA, K. "Rozbar vysledku nokusnehosuscrii zemedelskych hmot". Cast. I. Zpracovani udaju experimentalni susici krivky. Zemedelska technika, vol.13, nr.7, 1967, p. 399.
34. KUANG, S. "Dimensional analysis of seed moisture movement in deep - bed drying. Trans. A.S.A.E., vol. 14, nr. 2, 1971, p. 277.
35. KRICHER, P. "Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik. 2-e erweiterte Auflage. Springer Verlag, 1963.
36. JAESCHE LOTHAR "Über den Wärme - und stoffaustausch und das Trocknungsverhalten ruhender, luftdurchströmter Hau werke aus Körpern verschiedener, geometrischer Form in geordneter und ungeordneter Verteilung. Dissertation. Der Fak. für Maschinenbau der Technischen Hochschule Darmstadt, 1960.

37. LANDROCK, A.H.,
PROCTOR, B.E. "A new graphical interpolation method for obtaining humidity equilibria data". Food Tech. Lond, vol. 5, nr. 8, 1951.
38. LÎKOV, A.V. "Teoria uscării", trad. din lb. rusă. Ed. de stat pentru arhitectură și construcții, București, 1954.
39. LÎKOV, A.V.,
MIHAILOV, Iu.A. "Teoria teplo i massoperenosa". G.E.J. Moscova, Leningrad, 1963.
40. MANISOR, P. "Mașini și instalații pentru uscare și condiționarea produselor agricole". Ed. Agro-Silvică, București, 1967.
41. NELLIST, M.E.,
O'CALLAGHAN, J.R. "The measurement of drying rates in thin - layer of Ryegrass seed". J. agric. engng. res., vol. 10, nr.2 1971, p. 192.
42. OJHA, T.P.,
FARRAL, A.W.,
SHANAK, A.M.,
STINE, C.M. "Determination of heat transfer through powdered food products". Trans. A.S.A.E., vol. 10, nr. 4, 1967, p. 543.
43. OSBORNE, L.E. "Resistance to air flow of grain and ather seed". J. agric. engng. res., vol. 6, nr.1, 1961, p. 119.
44. OXLEY, T.A.,
HENDERSON, F.V. "The properties of grain in bulk". J. Soc. chem. ind., Lond., 1944, vol. 63, nr. 2, p. 48.
45. PABIS, S.,
HENDERSON, S.M. "Grain drying theory". II. A critical of the drying curve for shelled maize. J. agric. engng. res. vol. 6, nr. 4, 1961, p. 272.
46. PABIS, S.,
HENDERSON, S.M. "Grain drying theory". III. The air/grain temperature relationship. J. J. agric. engng. res. vol. 7, nr.1, 1962, p. 21.
47. PREOBRJENSKI, V. "Măsurări și aparate de măsurat termotehnice". Ed. tehnică, București, 1966.
48. PTITÎN, A. "Parametrii fundamentali ai procesului convectiv de uscare". Meh. i elektr. soc. hoz., nr.4, 1961, p.20.

49. SIMMONDS, H.C.,
WARD, G.T.,
M'EVER, E. "The drying of wheat grain". I. The mechanics of drying. Trans. Instn. Chem. Engrs. Lond., vol. 31, nr.3, 1953, p. 26.
50. SIMMONDS, H.C.,
WARD, G.T.,
M'EVER, E. "The drying of wheat grain". II. Through drying of deep beds. Trans. Instn. Chem. Engrs., Lond., vol. 31, nr.3, 1953, p. 33.
51. SIMMONDS, H.C.,
M'EVER, E.,
WARD, G.T. "The drying of wheat grain". III. Interpretation in terms of its biological structure. Trans. Instn. Chem. Engrs., Lond., vol. 32, nr. 2, p. 115.
52. SHERWOOD, T.K. "Drying of solids". I. Ind. Eng. Chem., 21 : 12, 1929.
53. SHERWOOD, T.K. "Drying of solids". II. Ind. Eng. Chem. 21 : 976, 1929.
54. SHERWOOD, T.K. "Drying of solids". VI. Ind. Eng. Chem. 25 : 1134, 1933.
55. SHU-TUNG CHU,
HUSTRULID, A. "Numerical solution of diffusion equation". Trans. A.S.A.E., vol. 11, nr.5, 1968, p. 705.
56. SHU-TUNG CHU,
HUSTRULID, A. "General characteristic of variable diffusivity process and the dynamic equilibrium moisture content". Trans. A.S.A.E., vol. 11, nr. 5, 1968, p. 709.
57. SPENCER, H.B. "A mathematical simulation of grain drying". J. agric. engng. res., vol. 14, nr. 3, 1969, p. 226.
58. THOMPSON, T.L.,
PEART, R.M.,
FOSTER, G.H. "Mathematical simulation of corn drying - a new model". Trans. A.S.A.E. vol. 11, nr. 4, 1968, p. 582.
59. TRANDAFIR, RODICA "Matematici pentru ingineri". Culegere de probleme, Editura tehnică, București, 1969.
60. VAN REST, D.J.,
ISAACS, G.W. "Exposed - layer drying rates of grain". Trans. A.S.A.E., vol. 11, nr. 2, 1968, p. 236.
61. WARNER, M.G.R.,
BROWNE, D.A. "Drying wheat 2 ft. deep in a 50 ft² tray". J. agric. engng. res. vol. 7, nr. 2, 1962, p. 112.

62. WOODFORDE, I., "The drying of grain". J. agric.
LAWTON, P.I. engng. res. vol. 10, nr.4, 1965,
 p. 383.
63. WOODFORDE, I., "Drying cereal grain in beeds six
LAWTON, P.I. inches deep". J. agric. engng. res.
 vol. 10, nr. 2, 1965, p. 146.
64. WOODFORDE, I., "The drying of wheat in beeds one
OSBORNE, L.E. and two feet deep". J. agric. engng.
 res. , vol. 6, nr. 4, p. 300.
65. x x x "Metode și instalații noi pentru us-
 carea cerealelor". Culegere de ma-
 terial documentar, I.D.T., București,
 1960.

Anexa 1

Regimul de uscare X (fig. 5.8)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 18 \%$; $T_0 = 292 \text{ K}$

Nr. crt.	G (s)	Temperatura semintelor și a aerului la nivelele:											
		x = 0 m		x = 0,05 m		x = 0,1 m		x = 0,15 m		x = 0,2 m		x = 0,25 m	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1.	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
2.	3	36,00	38	26,20	28,00	18,60	20,50	17,00	18,00	17,00	18,00	17,00	18,00
3.	5	36,50	38	31,60	32,60	23,40	24,20	19,50	19,50	19,50	20,20	19,50	20,20
4.	10	37,00	38	33,80	34,20	28,60	29,50	24,45	24,45	24,45	26,00	24,45	26,00
5.	15	37,10	38	34,60	34,90	31,20	32,00	28,20	28,20	28,20	30,00	28,20	30,00
6.	25	37,20	38	35,30	35,70	32,80	33,20	30,80	30,80	30,80	31,10	30,80	31,10
7.	40	37,50	38	35,50	36,10	33,50	34,20	31,80	31,80	31,80	32,50	31,80	32,50
8.	70	37,50	38	36,20	36,30	35,00	35,20	33,80	33,80	33,80	34,20	33,80	34,20
9.	105	37,50	38	36,60	37,00	35,60	36,00	34,70	34,70	34,70	35,00	34,70	35,00
10.	140	37,50	38	36,60	37,00	35,80	36,00	34,80	34,80	34,80	35,20	34,80	35,20
	210	37,50	38	36,60	37,00	35,80	36,00	35,00	35,00	35,00	36,00	35,00	36,00

Anexa 2

Regimul de uscare XIII (fig. 5.9)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 28,1 \%$; $T_0 = 293,60 \text{ K}$

Nr. crt.	G (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :							
		x = 0 m		x = 0,05 m		x = 0,1 m		x = 0,15 m	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1:	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
2:	3	37,70	42	22,80	24,00	21,80	21,90	21,15	21,40
3:	5	39,55	42	26,20	28,50	24,20	25,00	23,20	23,60
4:	10	40,20	42	31,40	33,80	25,70	26,70	24,80	25,80
5:	15	40,80	42	33,30	35,30	28,00	29,00	25,50	26,20
6:	25	41,50	42	35,20	36,70	31,60	32,00	27,60	28,90
7:	40	41,50	42	37,10	38,20	34,30	34,80	31,50	32,30
8:	70	41,50	42	38,40	39,00	36,00	36,60	34,00	34,55
9:	105	41,50	42	38,80	39,30	37,00	37,40	35,40	36,00
10:	140	41,50	42	39,30	39,90	37,70	37,85	36,40	37,00
	180	41,50	42	40,00	41,15	38,50	38,75	37,50	38,00

Regimul de uscare XI (fig. 5.10)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 19,90 \%$; $T_0 = 292 \text{ K}$

Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :

Nr. crt.	τ (s)	$x = 0 \text{ m}$		$x = 0,05 \text{ m}$		$x = 0,1 \text{ m}$		$x = 0,15 \text{ m}$	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1.	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
2.	3	35,30	38	25,00	27,00	21,15	21,65	20,70	20,00
3.	5	36,25	38	28,00	30,40	22,65	26,75	21,40	21,65
4.	10	36,75	38	31,85	33,00	26,55	27,85	23,00	23,80
5.	15	37,00	38	33,80	34,30	30,40	31,15	26,75	27,85
6.	25	37,50	38	34,55	35,05	32,40	32,90	29,90	30,75
7.	40	37,50	38	35,55	35,45	33,60	34,10	31,65	32,25
8.	70	37,50	38	35,55	35,90	34,30	34,80	33,10	33,55
9.	105	37,50	38	36,00	36,40	35,30	35,80	34,10	34,60
10.	140	37,50	38	36,60	36,85	36,00	36,50	35,15	35,50
	180	37,50	38	36,60	36,85	36,00	36,60	35,15	35,60

Anexa 4

Regimul de uscare XVI (fig. 5.11)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 26,72 \%$; $T_0 = 292,70 \text{ K}$

Temperatura semintelor si a aerului la nivelele:

Nr. crt.	τ (s)	$x = 0 \text{ m}$		$x = 0,05 \text{ m}$		$x = 0,1 \text{ m}$		$x = 0,15 \text{ m}$	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1.	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
2.	3	37,65	40	21,90	24,20	18,60	19,20	18,60	18,60
3.	5	39,10	40	26,80	29,20	20,20	20,75	19,50	19,80
4.	10	39,60	40	31,65	33,25	23,60	25,25	21,20	22,10
5.	15	39,60	40	34,10	35,40	28,00	29,90	24,85	25,85
6.	25	39,60	40	35,90	36,60	31,65	32,60	29,20	29,80
7.	40	39,60	40	36,90	37,60	33,60	34,20	31,80	32,65
8.	70	39,60	40	37,75	37,90	35,20	35,55	33,80	34,25
9.	105	39,60	40	38,25	38,50	36,30	36,55	35,20	35,55
10.	140	39,60	40	38,35	38,70	36,55	36,80	35,65	36,15
	180	39,60	40	38,80	39,00	37,50	37,75	36,50	36,75

Regimul de uscare IX (fig. 5.12)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 21,90 \%$; $T_0 = 293 \text{ K}$

Nr. crt.	G (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :							
		x = 0 m		x = 0,05 m		x = 0,1 m		x = 0,15 m	
		T, (K)	O, (K)	T, (K)	O, (K)	T, (K)	O, (K)	T, (K)	O, (K)
	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
1.	3	34,65	38	21,65	24,35	18,80	20,50	20,00	20,50
2.	5	36,10	38	27,75	29,45	21,50	22,80	20,20	21,60
3.	10	36,90	38	32,20	33,20	26,05	27,75	21,25	23,50
4.	15	37,20	38	33,45	34,20	28,75	30,20	25,00	25,90
5.	25	37,50	38	34,55	35,20	31,40	32,25	29,20	29,50
6.	35	37,50	38	34,80	35,50	32,25	33,00	30,40	30,70
7.	45	37,50	38	35,15	35,40	32,90	33,35	31,15	31,50
8.	80	37,50	38	35,55	35,90	34,05	34,30	32,70	32,90
9.	120	37,50	38	35,75	36,10	34,55	34,80	33,75	34,00
10.	160	37,50	38	36,00	36,40	34,70	34,95	34,10	34,40
11.	190	37,50	38	36,15	36,50	35,15	35,40	34,40	34,80

Regimul de uscare XIV (fig. 5.14)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 29 \%$; $T_0 = 294 \text{ K}$

Nr. crt.	τ (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :							
		$x = 0 \text{ m}$		$x = 0,05 \text{ m}$		$x = 0,1 \text{ m}$		$x = 0,15 \text{ m}$	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1.	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
2.	3	38,70	42	26,75	27,15	23,70	23,90	23,25	23,60
3.	5	39,65	42	31,40	31,90	25,05	25,60	24,70	24,90
4.	10	40,50	42	34,75	35,50	27,85	29,10	25,60	25,90
5.	15	40,75	42	36,50	36,90	30,65	32,60	27,25	28,50
6.	25	41,30	42	37,80	38,10	34,10	35,10	31,10	32,10
7.	40	41,80	42	38,90	39,10	36,00	36,60	34,00	34,55
8.	70	41,80	42	39,40	39,60	37,20	37,70	35,80	36,50
9.	105	41,80	42	39,60	40,00	37,80	38,20	36,75	37,25
10.	140	41,80	42	40,20	40,50	39,90	39,90	37,80	38,35
	180	41,80	42	40,40	40,60	39,30	39,55	38,70	38,95

Anexa 7

Regimul de uscare XV (fig. 5.15)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,045$; $U_0 = 27 \%$; $T_0 = 292,2 \text{ K}$

Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :

Nr. crt.	ζ (s)	$x = 0 \text{ m}$		$x = 0,05 \text{ m}$		$x = 0,1 \text{ m}$		$x = 0,15 \text{ m}$	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1.	x 60	273 + 38,00	273 + 42	273 + 24,60	273 + 25,80	273 + 19,50	273 + 20,10	273 + 19,50	273 + 19,50
2.	3	40,00	42	30,65	34,10	22,65	23,60	20,10	20,60
3.	5	40,90	42	35,80	37,60	29,70	30,65	24,80	25,40
4.	10	41,10	42	37,10	38,50	32,80	33,70	29,45	29,90
5.	15	41,50	42	38,35	39,05	34,65	35,40	32,25	32,80
6.	25	41,60	42	39,05	39,65	36,25	36,70	34,20	34,60
7.	40	41,60	42	40,40	40,75	38,20	38,95	37,00	37,40
8.	70	41,60	42	40,60	40,90	38,80	39,20	37,50	37,80
9.	105	41,60	42	41,10	41,40	39,65	40,00	38,70	39,00
10.	140	41,60	42	41,40	41,60	40,10	40,30	39,60	39,80
	180	41,60	42	41,40	41,60	40,10	40,30	39,60	39,80

Regimul de uscare XII (fig. 5.16)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 19,70 \%$; $T_0 = 294,30 \text{ K}$

Nr. crt.	τ (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :											
		$x = 0 \text{ m}$		$x = 0,05 \text{ m}$		$x = 0,1 \text{ m}$		$x = 0,15 \text{ m}$		$x = 0,2 \text{ m}$		$x = 0,25 \text{ m}$	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
1.	3	273 + 36,50	273 + 38	273 + 27,15	273 + 27,75	273 + 22,85	273 + 23,75	273 + 22,40	273 + 23,75	273 + 22,40	273 + 22,50	273 + 22,40	273 + 22,50
2.	5	37,00	38	30,90	31,40	25,80	26,90	23,50	26,90	23,50	23,85	23,50	23,85
3.	10	37,60	38	34,55	34,70	31,25	32,15	26,25	32,15	26,25	27,50	26,25	27,50
4.	20	37,70	38	36,00	30,20	34,20	34,70	31,60	34,70	31,60	32,40	31,60	32,40
5.	30	37,80	38	30,50	36,65	35,15	35,30	33,10	35,30	33,10	33,80	33,10	33,80
6.	60	37,80	38	36,75	36,85	36,00	36,25	34,45	36,25	34,45	35,00	34,45	35,00
7.	90	37,80	38	36,85	37,00	36,40	36,50	35,20	36,50	35,20	35,40	35,20	35,40
8.	120	37,80	38	36,85	37,00	36,50	36,60	35,40	36,60	35,40	35,50	35,40	35,50
9.	150	37,80	38	36,85	37,00	36,50	36,60	35,50	36,60	35,50	35,60	35,50	35,60

Regimul de uscare I (fig. 5.17)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 24 \%$; $T_0 = 294,50 \text{ K}$

Nr. crt.	t (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :												
		x = 0 m			x = 0,1 m			x = 0,2 m			x = 0,3 m			
		T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	
	x 60	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	+ 273	
1.	3	34,10	38,00	17,80	17,50	18,25	18,25	18,25	18,25	18,25	18,25	18,25	18,25	19,40
2.	5	35,30	38,00	19,50	18,25	17,80	17,80	17,85	17,85	17,85	17,85	17,85	17,85	18,50
3.	10	36,50	38,00	22,50	20,50	18,25	18,25	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,70
4.	15	37,00	38,00	28,70	26,80	19,50	19,50	20,60	20,60	20,60	20,60	20,60	20,60	19,50
5.	25	37,20	38,00	30,45	29,20	20,70	20,70	21,80	21,80	21,80	21,80	21,80	21,80	19,80
6.	40	37,50	38,00	31,80	30,90	23,80	30,90	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	20,80
7.	80	37,50	38,00	33,70	32,00	28,00	32,00	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	23,60
8.	120	37,75	38,00	34,80	33,50	29,50	33,50	30,00	29,50	30,00	30,00	30,00	30,00	26,60
9.	160	37,75	38,00	35,30	34,20	31,65	34,20	32,00	31,65	32,00	32,00	32,00	32,00	29,80
10.	200	37,75	38,00	36,30	35,80	32,40	35,80	32,60	32,40	32,60	32,60	32,60	32,60	31,65

Regimul de uscare II (Fig. 5.18)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 24 \%$; $T_0 = 291,25 \text{ K}$

Nr. crt.	C (s)	Temperatura semintelor și a aerului la nivelele:												Umiditatea semintelor la nivelele: (%)				
		x = 0 m			x = 0,1 m			x = 0,2 m			x = 0,3 m			x=0	x=0,1	x=0,2	x=0,3	
		T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	θ , (K)				
1.	5	273 + 37,00	273 + 38	273 + 19,70	273 + 20,90	273 + 18,25	273 + 19,00	273 + 18,25	273 + 18,25	273 + 19,00	273 + 18,25	273 + 18,25	273 + 18,25	-	-	-	-	-
2.	10	37,50	38	24,00	25,30	19,00	20,80	19,00	19,00	20,80	19,00	19,00	19,00	-	-	-	-	-
3.	15	37,50	38	28,60	31,40	20,60	23,60	20,60	19,60	23,60	19,60	19,60	19,60	-	-	-	-	-
4.	20	37,50	38	30,00	33,20	23,50	26,20	23,50	20,30	26,20	20,30	20,30	21,80	-	-	-	-	-
5.	30	37,50	38	32,80	33,80	27,40	28,00	27,40	23,00	28,00	23,00	23,00	24,50	-	-	-	-	-
6.	60	37,50	38	32,80	34,00	29,80	30,20	29,80	26,70	30,20	26,70	26,70	27,80	20,90	21,40	21,80	21,30	22,10
7.	90	37,50	38	33,60	34,50	30,80	31,30	30,80	28,30	31,30	28,30	28,30	29,40	22,20	20,75	21,30	21,30	22,10
8.	120	37,50	38	33,90	34,60	31,50	32,00	31,50	29,20	32,00	29,20	29,20	30,20	19,70	20,30	21,00	21,00	21,70
9.	150	37,50	38	34,30	35,00	32,30	32,70	32,30	29,60	32,70	29,60	29,60	30,90	19,25	20,10	20,75	20,75	21,45
10.	180	37,50	38	34,40	35,00	32,40	32,80	32,40	30,20	32,80	30,20	30,20	31,15	19,10	19,90	20,60	20,60	21,40
11.	210	37,50	38	34,40	35,10	32,50	32,90	32,50	30,30	32,90	30,30	30,30	31,15	19,00	19,75	20,45	20,45	21,30
														18,85	19,60	20,30	20,30	21,20

7 20,20

Regimul de uscare V (fig. 5.19)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 32,70 \%$; $T_0 = 290 \text{ K}$

Nr. crt.	τ (s)	Temperatura semintelor și a aerului la nivelele :												Umiditatea semintelor la nivelele :		
		$x = 0,1 \text{ m}$			$x = 0,2 \text{ m}$			$x = 0,3 \text{ m}$			$x=0,1$	$x=0,2$	$x=0,3$			
		$T, (K)$	$\theta, (K)$	$T, (K)$	$\theta, (K)$	$T, (K)$	$\theta, (K)$	$T, (K)$	$\theta, (K)$	$T, (K)$	$\theta, (K)$	$T, (K)$	$\theta, (K)$			
	$x = 60$	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	-	-	-
1.	3	39,20	42	24,60	25,50	23,60	23,60	21,90	22,50	21,90	22,50	21,90	22,50	-	-	-
2.	5	40,10	42	25,60	25,80	24,80	24,80	23,80	24,35	23,80	24,35	23,80	24,35	-	-	-
3.	10	41,10	42	26,10	26,20	26,00	26,00	25,80	25,80	25,80	25,80	25,80	25,80	32,10	32,60	32,60
4.	20	41,60	42	28,50	29,80	26,00	26,00	25,80	25,80	25,80	25,80	25,80	25,80	31,20	32,50	32,60
5.	30	41,60	42	32,40	33,80	26,20	26,80	26,80	25,80	25,80	25,80	25,80	25,80	29,60	32,30	32,50
6.	40	41,60	42	34,00	34,80	26,75	27,75	27,75	25,80	25,80	25,80	25,80	25,80	28,60	32,00	32,40
7.	60	41,60	42	35,30	36,10	29,00	30,00	30,00	26,20	26,20	27,00	27,00	27,00	26,50	31,30	32,00
8.	90	41,60	42	36,75	37,25	32,80	33,20	33,20	28,00	28,00	28,75	28,75	28,75	24,00	28,60	30,80
9.	140	41,60	42	37,75	38,00	35,00	35,25	35,25	31,50	31,50	31,90	31,90	31,90	21,30	24,00	26,60
10.	185	41,60	42	38,75	39,20	36,50	36,80	36,80	33,50	33,50	33,85	33,85	33,85	19,10	21,50	23,40
11.	220	41,60	42	39,00	39,40	37,00	37,25	37,25	35,30	35,30	35,50	35,50	35,50	18,00	20,30	21,80

Regimul de uscare IV (fig. 5.20)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 27 \%$; $T_0 = 293,70 \text{ K}$

Nr. crt.	τ (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelele :											
		$x = 0 \text{ m}$			$x = 0,1 \text{ m}$			$x = 0,2 \text{ m}$			$x = 0,3 \text{ m}$		
		T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	θ , (K)
	$x \leq 60$	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
1.	3	36,50	38	18,75	19,50	18,75	18,75	18,75	19,00	18,25	18,90	18,90	18,90
2.	5	37,10	38	20,70	22,65	18,75	18,75	19,20	19,20	18,75	19,00	19,00	19,00
3.	10	37,20	38	24,35	26,70	19,50	19,50	20,00	20,00	19,25	19,35	19,35	19,35
4.	20	37,20	38	29,20	30,40	21,40	21,40	21,90	21,90	20,00	20,15	20,15	20,15
5.	30	27,50	38	31,10	31,70	24,36	24,36	25,30	25,30	20,70	21,20	21,20	21,20
6.	40	37,70	38	31,90	32,60	26,30	26,30	27,00	27,00	22,40	23,10	23,10	23,10
7.	80	37,70	38	33,25	34,00	29,40	29,40	29,90	29,90	26,50	27,00	27,00	27,00
8.	120	37,70	38	34,30	34,70	31,15	31,15	31,65	31,65	29,20	29,60	29,60	29,60
9.	175	37,70	38	35,25	35,40	32,80	32,80	33,10	33,10	31,00	31,20	31,20	31,20
10.	210	37,70	38	35,75	35,80	34,00	34,00	34,30	34,30	32,00	32,30	32,30	32,30

Regimul de uscare VIII (fig. 5.21)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 27 \%$; $T_0 = 299,20 \text{ K}$

Nr. crt.	τ (s)	Temperatura semințelor și a aerului la nivelele :											
		$x = 0,0 \text{ m}$			$x = 0,1 \text{ m}$			$x = 0,2 \text{ m}$			$x = 0,3 \text{ m}$		
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
	$x = 60$	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
1.	3	37,70	42	22,60	22,85	21,65	21,90	21,65	21,90	21,65	21,90	21,65	21,90
2.	5	39,20	42	23,70	23,85	23,10	23,10	23,10	23,10	22,35	22,50	22,35	22,50
3.	10	40,15	42	26,50	27,25	25,00	25,60	25,00	25,60	24,35	24,60	24,35	24,60
4.	15	40,90	42	29,40	30,40	25,55	25,85	25,55	25,85	25,30	25,55	25,30	25,55
5.	25	41,10	42	32,30	33,00	26,30	26,90	26,30	26,90	26,05	26,10	26,05	26,10
6.	35	41,40	42	34,00	34,65	27,50	27,95	27,50	27,95	26,15	26,20	26,15	26,20
7.	45	41,60	42	34,80	35,30	28,70	29,80	28,70	29,80	26,15	26,20	26,15	26,20
8.	60	41,60	42	35,75	36,00	30,15	30,85	30,15	30,85	26,40	26,65	26,40	26,65
9.	100	41,60	42	36,50	36,75	32,00	32,35	32,00	32,35	28,00	28,10	28,00	28,10
10.	140	41,60	42	37,70	37,75	33,70	34,10	33,70	34,10	30,20	30,30	30,20	30,30
11.	180	41,60	42	37,90	37,95	34,30	34,35	34,30	34,35	31,90	32,00	31,90	32,00
12.	220	41,60	42	38,20	38,30	35,20	35,40	35,20	35,40	32,85	33,00	32,85	33,00

Regimul de uscare VI (fig. 5.22)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 32 \%$; $T_0 = 290,65 \text{ K}$

Temperatura semintelor și a aerului la nivelele :

Nr. crt.	C (s)	x = 0 m		x = 0,1 m		x = 0,2 m		x = 0,3 m	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
1.	3	38,20	42	20,70	21,20	20,10	20,20	19,25	19,50
2.	5	39,00	42	21,50	22,70	20,60	20,70	20,20	20,30
3.	10	40,10	42	25,80	29,00	21,90	22,80	21,65	21,90
4.	20	41,10	42	31,10	33,30	22,65	23,00	22,75	22,75
5.	30	41,50	42	32,80	34,30	23,15	23,80	21,90	21,90
6.	40	41,50	42	34,00	35,40	25,55	26,80	22,25	22,25
7.	90	41,50	42	37,10	37,80	31,65	32,60	27,40	28,25
8.	140	41,50	42	38,40	39,00	34,30	34,70	31,00	31,90
9.	190	41,50	42	39,00	39,50	35,40	36,00	32,70	33,20
10.	220	41,50	42	39,30	39,50	36,50	36,80	34,30	35,30

Regimul de uscare VII (figura 5.23)

$\theta_0 = 315 \text{ K}$; $\varphi = 20 \%$; $G_a = 0,0234 \text{ kg/s}$; $U_0 = 20,1 \%$; $T_0 = 289,5 \text{ K}$

Nr. crt.	τ (s)	Temperatura semintelor si a aerului la nivelelele :											
		$x = 0 \text{ m}$		$x = 0,1 \text{ m}$		$x = 0,2 \text{ m}$		$x = 0,3 \text{ m}$					
		T, (K)	O, (K)	T, (K)	O, (K)	T, (K)	O, (K)	T, (K)	O, (K)				
	$x \ 60$	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
1.	3	36,00	16,50	17,00	16,50	16,80	16,50	16,40	16,50	16,50	16,50	16,50	16,50
2.	5	38,00	18,75	20,00	16,50	16,90	16,50	16,50	16,50	16,90	16,50	16,50	16,60
3.	10	39,80	26,80	28,00	18,25	18,50	18,50	17,65	17,65	18,50	17,65	17,65	17,80
4.	20	41,60	32,80	33,85	24,10	25,55	24,10	19,95	19,95	25,55	19,95	19,95	20,45
5.	30	41,60	34,40	35,20	28,10	29,20	28,10	23,10	23,10	29,20	23,10	23,10	23,45
6.	40	41,60	35,00	35,50	29,90	30,90	29,90	25,65	25,65	30,90	25,65	25,65	26,20
7.	90	41,60	36,50	37,00	33,35	33,80	33,35	30,40	30,40	33,80	30,40	30,40	31,00
8.	140	41,60	37,10	37,50	34,70	35,00	34,70	32,35	32,35	35,00	32,35	32,35	32,85
9.	190	41,60	37,60	37,80	35,50	35,90	35,50	33,80	33,80	35,90	33,80	33,80	34,05
10.	240	41,60	38,60	39,00	36,70	37,00	36,70	35,30	35,30	37,00	35,30	35,30	35,40

Regimul de uscare III (figura 5.24)

$\theta_0 = 311 \text{ K}$; $\varphi = 30 \%$; $G_a = 0,045 \text{ kg/s}$; $U_0 = 31 \%$; $T_0 = 291,50 \text{ K}$

Temperatura semintelor și a aerului la nivelele:

Nr. crt.	z (s)	x = 0 m		x = 0,1 m		x = 0,2 m		x = 0,3 m	
		T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)	T, (K)	θ , (K)
	x 60	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +	273 +
1.	3	35,90	38	21,25	21,40	20,45	20,70	19,50	20,00
2.	5	36,25	38	23,10	23,60	21,65	21,90	21,05	21,40
3.	10	36,50	38	26,80	27,60	21,90	22,30	21,90	22,10
4.	20	37,20	38	30,40	31,10	25,10	25,70	22,90	23,10
5.	30	37,70	38	31,65	32,15	27,40	28,40	23,80	24,40
6.	45	37,70	38	32,00	32,30	28,00	28,80	24,40	25,10
7.	60	37,70	38	32,15	32,60	28,60	29,25	25,10	25,80
8.	90	37,70	38	33,35	33,85	30,00	30,50	26,80	27,40
9.	120	37,70	38	33,80	34,10	30,40	31,05	27,70	28,50
10.	150	37,70	38	34,10	34,40	31,20	31,70	28,20	28,75
11.	180	38,00	38	34,80	35,10	32,00	32,80	29,20	30,00
12.	210	38,00	38	35,00	35,40	32,50	33,00	29,90	30,40