
CAPITOLUL VII

OPERATIILE TRANSFERULUI DE MASA

Operatiile transferului de masa, denumite si **operatiile difuziei**, reprezinta aplicatii ale transferului de masa insotit de transferal de impuls si, in anumite operatii, de transferul de caldura. Principalele operatii ale transferului de masa in care difuzia este insotita de transferal de impuls si de caldura sunt: **uscarea, distilarea-rectificarea, cristalizarea, sublimarea-desublimarea**. Unele operatii, cum ar fi: **absorbția-desorbția, extractia lichid-lichid, extractia solid-lichid si adsorbția-desorbția** sunt operatii izoterme astfel incat transferal de caldura nu este prezent. Dintre operatiile mentionate anterior se prezinta, in continuare, **uscarea materialelor solide**.

VII.1. Uscarea materialelor solide.

In multe tehnologii de sinteza sau de prelucrare unele dintre produse finite sau semifabricate contin umiditate intr-o anumita proportie. Din motive de prelucrare ulterioara, de depozitare, transport sau de conservare, este necesar sa se reduca continutul de umiditate al anumitor produse, utilizand procedee care depind de starea lor de agregare. Principalele procedee de indepartare a umiditatii dintr-un material, in functie de starea lui de agregare sunt prezentate in tabelul VII.1.

In acest capitol se prezinta numai **uscarea materialelor solide**. Din tabelul VII.1 rezulta ca uscarea este un procedeu termic de indepartare a umiditatii dintr-un material. Aceasta deoarece in operatia de uscare umiditatea din material este transformata din lichid in vapori prin aport de caldura din exterior. Dar in uscare transferal de caldura se

Florin Vitan - Ingineria proceselor in textile si pielarie
Vol. III – Operatiile transferului de caldura si de difuzie si utilaje specifice

desfasoara simultan cu transferal de masa, deoarece evaporarea umiditatii este insotita de difuzia vaporilor formati, prin material si in exteriorul lui.

Dintre metodele de uscare a materialelor solide prezentate in tabelul VII.1, cea mai utilizata este **uscarea convectiva** cunoscuta si ca **uscarea cu agenti termici de uscare**. In uscarea convective caldura necesara vaporizarii umiditatii din material este furnizata de un **gaz cald**, denumit **agent de uscare**, care scaldă sau strabate materialul. Agentul de uscare are si rolul de a prelua vaporii de umiditate si de ai antrena in afara spatiului de uscare. Cei mai utilizati agenti de uscare sunt: **aerul cald**, **gazele de ardere**, **gazele inerte**, **aburul supraincalzit**.

Materialele solide supuse uscarii se pot prezenta in diverse forme, cum ar fi: granule, panze foi, placi, paste, etc.

Deoarece in uscarea convectiva gazul preia umiditatea din material sub forma de vapori, proprietatile amestecului gaz-vapori sunt determinante pentru statica si cinetica operatiei. Din acest motiv, inainte de a aborda principalele aspecte teoretice ale operatiei

Tabelul VII.1

Metode de indepartare a umiditatii	Starea de agregare a materialului				
	Solida	Lichida	Gazoasa		
Mecanice	Sedimentare				
	Centrifugare				
	Filtrare				
	Presare				
Fizico-chimice	Materiale higroscopice				
	Adsorbție				
		Extractie	Absorbție		
Termice	Uscare	Cu agenti termici de uscare (convective)	Gazul scaldă materialul	Racire	
			Gazul strabate materialul		In strat fix
					In strat mobil
					In strat fluidizat
	In strat strapuns				
	Prin contact direct cu o suprafata incalzita				
	Cu radiatii infrarosii				
	In curenti de inalta frecventa				
Sublimare	Vaporizare				
	Distilare				
	Rectificare				

de uscare convectiva, se vor prezenta principalele proprietati ale amestecurilor de gaze si vapori, care intervin in relatiile care descriu statica si cinetica uscarii.

VII.1.1. Proprietatile amestecurilor de gaze si vapori

Proprietatile principale ale amestecurilor gaz-vapori, importante pentru uscare sunt:

a. Umiditatea relativa a gazului, φ , este definita prin raportul:

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} \quad (\text{VII.1})$$

in care: ρ_v , reprezinta masa vaporilor din unitatea de volum de gaz nesaturat cu vapori, in conditii date de presiune si de temperatura, iar ρ_{vs} , reprezinta masa vaporilor din unitatea de volum de gaz saturat cu vapori, adica cantitatea maxima de vapori pe care o poate contine gazul in aceleasi conditii de temperatura si de presiune. La presiuni moderate se considera aplicabila legea gazelor perfecte atat pentru gazul cat si pentru vaporii din amestec, ceea ce permite exprimarea umiditatii relative si in functie de presiunile partiale. Pentru vaporii nesaturati din amestec, legea gazului perfect se exprima prin relatia:

$$P_v \cdot V = n_v \cdot R \cdot T \quad (\text{VII.2})$$

in care:

P_v - presiunea partiala a vaporilor in gazul nesaturat;
 V - volumul amestecului;
 n_v - numarul de moli ai vaporilor;
 R - constanta universala a gazelor;
 T - temperature absoluta a amestecului.

Numarul de moli, n_v , poate fi exprimat prin raportul: $n_v = \frac{m_v}{M_v}$, unde M_v , reprezinta masa

molară a vaporilor, iar $\frac{m_v}{V} = \rho_v$, si relatia (VII.2) devine:

$$P_v = \frac{\rho_v}{M_v} RT \quad (\text{VII.3})$$

Similar se stabileste si relatia care exprima presiunea partiala a vaporilor saturati, P_s , in functie de ρ_{vs} , rezultand:

$$P_s = \frac{\rho_{vs}}{M_v} RT \quad (\text{VII.4})$$

Inlocuind pe ρ_v si pe ρ_{vs} , exprimatii din relatiile (VII.3) si (VII.4), in relatia (VII.1), rezulta:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{VII.5})$$

Daca raportul dat de relatia (VII.5) se inmulteste cu 100 se obtine umiditatea relativa in procente. Umiditatea relativa are valori cuprinse intre 0-1, respectiv intre 0-100% si exprima gradul de saturare al gazului cu vapori. Valoarea $\varphi = 1$, corespunde gazului saturat cu vapori iar pentru $\varphi = 0$, gazul nu contine vapori.

b. Continutul de umiditate al gazului, x, reprezinta masa vaporilor care insoteste unitatea de masa de gaz absolut uscat. Daca se noteaza cu, m_v , masa vaporilor din amestec iar cu, m_a , masa gazului din amestec, rezulta:

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad \left[\frac{\text{Kg vapori}}{1 \text{ Kg gaz uscat}} \right] \quad (\text{VII.6})$$

Considerand valabila legea gazelor perfecte pentru vaporii si gazul din amestec se poate stabili o relatie intre continutul de umiditate si umiditatea relativa, astfel:

$$P_v \cdot V = n_v \cdot R \cdot T \quad (\text{VII.7})$$

$$P_a \cdot V = n_a \cdot R \cdot T \quad (\text{VII.8})$$

Dar, $n_v = \frac{m_v}{M_v}$, iar $n_a = \frac{m_a}{M_a}$, si deci:

$$P_v \cdot V = \frac{m_v}{M_v} \cdot R \cdot T \quad (\text{VII.9})$$

respectiv:

$$P_a \cdot V = \frac{m_a}{M_a} \cdot R \cdot T \quad (\text{VII.10})$$

din care:

$$\frac{P_v}{P_a} = \frac{m_v}{m_a} \cdot \frac{M_a}{M_v} = x \cdot \frac{M_a}{M_v} \quad (\text{VII.11})$$

sau:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{P_v}{P_a} \quad (\text{VII.12})$$

Daca se noteaza cu, **P**, presiunea totala a amestecului si tinand cont ca:

$$P = P_v + P_a \quad (\text{VII.13})$$

Rezulta ca:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{VII.14})$$

Dar, conform relatiei (VII.5), $P_v = \varphi \cdot P_s$, si relatia (VII.14) se poate scrie si in forma:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{\varphi \cdot P_s}{P - \varphi \cdot P_s} \quad (\text{VII.15})$$

In cazul amestecurilor formate din aer si vapori de apa : $\frac{M_v}{M_a} = \frac{18}{28,9} = 0,622$ si relatia (VII.15)

devine:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_s}{P - \varphi \cdot P_s} \quad (\text{VII.16})$$

c. Entalpia amestecurilor de gaze si vapori, I, exprima continutul de energie termica al amestecului si este data de suma entalpiilor componentilor amestecului. Considerand ca fiecare Kg de gaz uscat este insotit de x Kg de umiditate sub forma de vapori, entalpia amestecului va fi data de relatia :

$$I = I_a + x \cdot I_v \quad (\text{VII.17})$$

in care: $I_a = c_{pa}t$, este entalpia gazului iar $I_v = r + c_{pv}t$, este entalpia vaporilor la temperatura, t .
 Prin urmare:

$$I = c_{pa} \cdot t + x(r + c_{pv} \cdot t) \quad (\text{VII.18})$$

Pentru amestecurile de aer si vapori de apa, cel mai frecvent intalnite in practica uscarii,

$c_{pa} \approx 1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$, $c_{pv} \approx 2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$ iar caldura latentă de vaporizare, $r \approx 2500 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$ si deci:

$$I = t + x(2500 + 2 \cdot t) \quad \left[\frac{\text{J}}{1 \text{ Kg aer uscat}} \right] \quad (\text{VII.19})$$

Proprietatile amestecurilor de gaze si vapori si relatiile dintre acestea pot fi prezentate si sub forma unor grafice. Dintre acestea, in uscare, se foloseste frecvent diagrama I-x, denumita si diagrama **Mollier**. Deoarece gazul umed este caracterizat prin trei variabile de stare independente: **presiunea totala**, **temperatura** si **continutul de umiditate**, la trasarea diagramei I-x se fixeaza presiunea la o valoare constanta. Pentru exemplificare se prezinta constructia acestei diagrame pentru amestecul de aer-vapori de apa. Diagrama I-x

are doua abscise, o **abscisa principala** pe care se masoara continutul de umiditate, x , si o **abscisa secundara**, care face un unghi de 135° cu ordonata si care reprezinta izoentropa $l=0$. Pe ordonata se masoara entalpia, dar izoentalpele sunt paralele cu abscisa secundara (fig. VII.1).

Pentru o valoare, x , a continutului de umiditate se duce din punctul A o perpendiculara pe abscisa principala. La scara aleasa segmentul $\overline{AB} = 2500 \cdot x$. Pe aceeași perpendiculara se fixeaza segmentul $\overline{AC} = 2 \cdot t \cdot x$. Deci segmentul $\overline{BC} = 2500 \cdot x + 2 \cdot t \cdot x$. In prelungirea segmentului \overline{BC} se fixeaza si segmentul $\overline{CD} = t$. Prin urmare segmentul $\overline{BD} = t + x(2500 + 2 \cdot t)$ da valoarea entalpiei amestecului aer-apa, conform relatiei (VII.19). Pentru diferite valori ale temperaturii, t , se obtin o familie de izoentalpe, $l=\text{constant}$, paralele cu abscisa secundara.

Se demonstreaza ca pe aceasta diagrama toate izotermele intersecteaza abscisa principala intr-un punct $x = -\frac{1}{2}$. Deoarece valorile practice ale lui x , pentru amestecurile de aer-apa sunt cuprinse între 0-0,1 $\left[\frac{\text{Kg apa}}{\text{Kg aer uscat}} \right]$, fata de campul

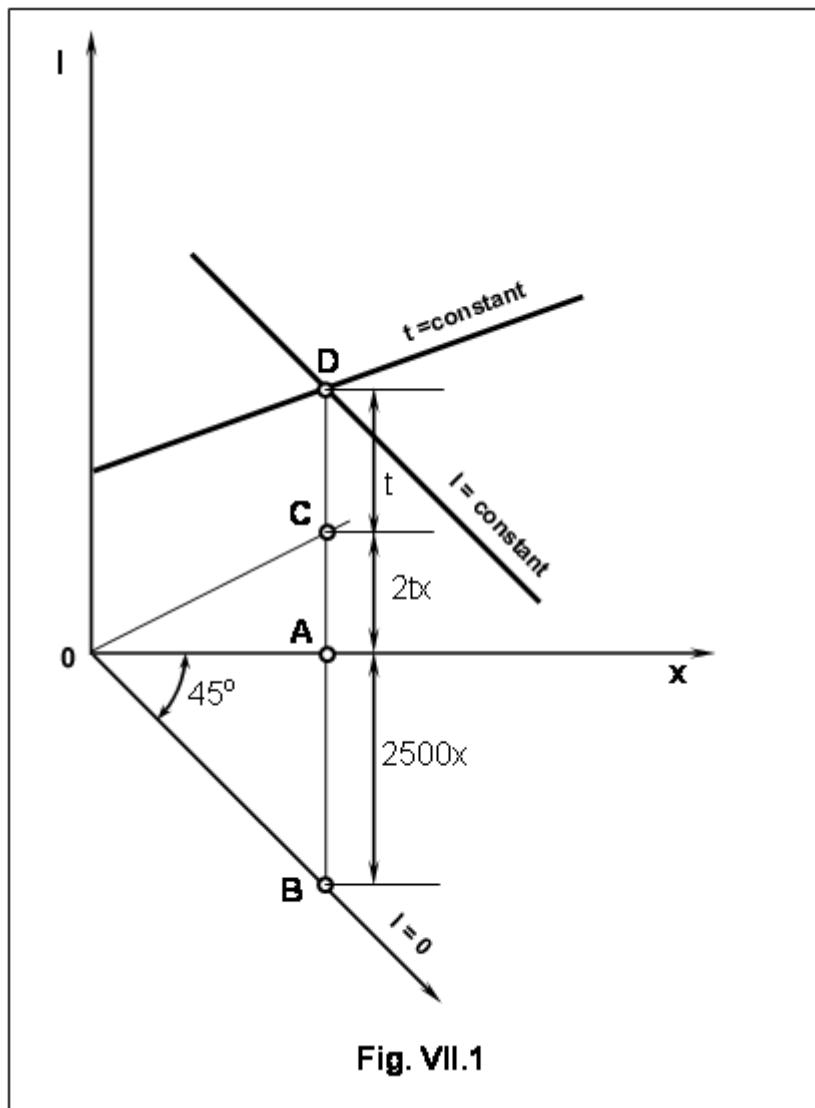


Fig. VII.1

diagramei punctul $x = -0,5$ este foarte îndepărtat, astfel încât pe diagrama izotermele sunt practic paralele.

Pe aceeași diagramă se trasează și curbele de umiditate relativă constantă, folosind relația (VII.16). Pentru o valoare fixată a umidității relative, φ , punctele curbei se obțin prin intersecția izotermelor, t , cu verticalele $x=\text{constant}$, procedându-se astfel: se alege arbitrar câteva valori ale lui x și pentru fiecare valoare se calculează din relația (VII.16), presiunea vaporilor saturați, P_s . Din tabele se determină temperatura pentru valorile P_s , calculate anterior. Intersecția dintre izoterma astfel determinată și verticala $x=\text{constant}$ da un punct

de pe curba $\varphi = \text{const}$. Curbele $\varphi = \text{const}$ pornesc din origine si se intrerup la temperatura $t=100^\circ\text{C}$ (la $P=1$ atm) dupa care se continua pe verticala, deoarece la aceasta temperatura $P_s=P$ si conform relatiei (VII.16), rezulta:

$$x = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi} \tag{VII.20}$$

Diagrama I-x, pentru amestecul de aer si vapori de apa, la presiunea atmosferica, este prezentata in figura de mai jos.

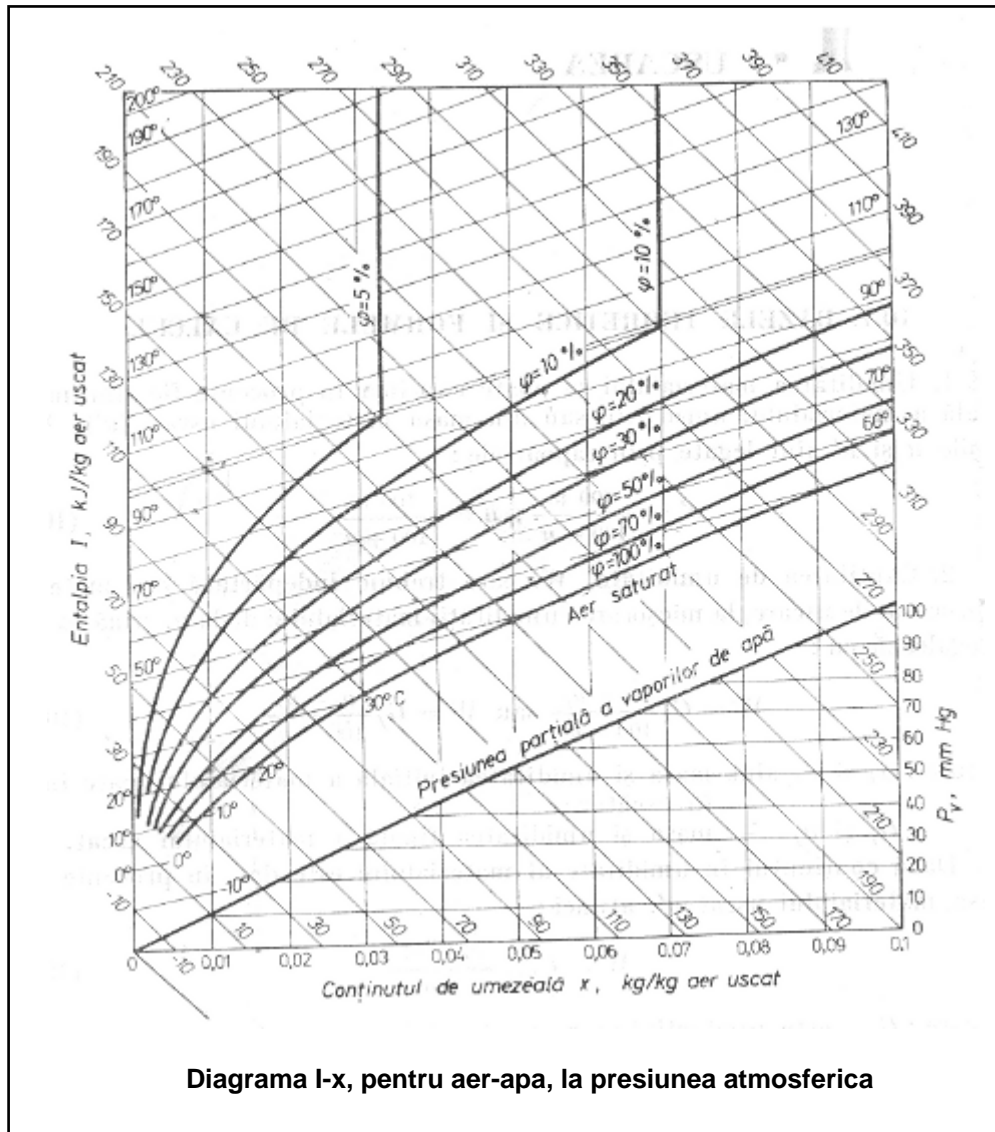


Diagrama I-x se poate utiliza pentru determinarea rapida a proprietatilor aerului umed daca se cunosc cel puțin doi dintre parametrii acestuia. De exemplu, daca se cunoaste temperatura, t , si umiditatea relativa, φ , la intersecția izotermei cu curba

umiditatii relative se gaseste punctul A (fig.VII.2). Daca se duce prin punctul A o paralela la abscisa secundara, $l=0$, intersectia acesteia cu ordonata da valoarea entalpiei iar abscisa punctului A da continutul de umiditate, x .

Cu ajutorul diagramei $l-x$ se pot defini si alte doua proprietati importante ale amestecurilor de gaze si vapori si anume: **temperatura punctului de roua** si **temperatura termometrului umed**. Se face precizarea ca aceste marimi reprezinta proprietati ale gazului saturat cu umiditate.

d. Temperatura punctului de roua reprezinta temperatura amestecului la care gazul devine saturat in vaporii umiditatii, prin racire la $x=constant$. Daca amestecul este racit la $x=constant$, umiditatea relativa creste, concomitent cu scaderea temperaturii (fig. VII.3). Valoarea temperaturii pentru care $\varphi = 1$ se numeste **temperatura punctului de roua**, deoarece la atingerea saturatiei vaporii umiditatii condenseaza cu formarea unor picaturi fine de lichid.

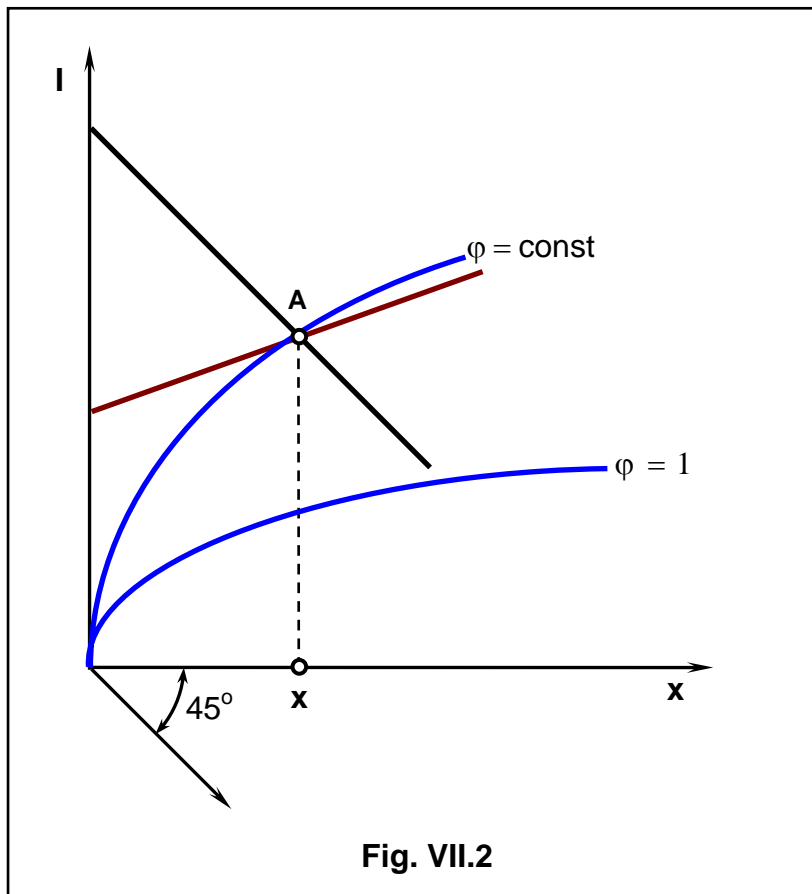
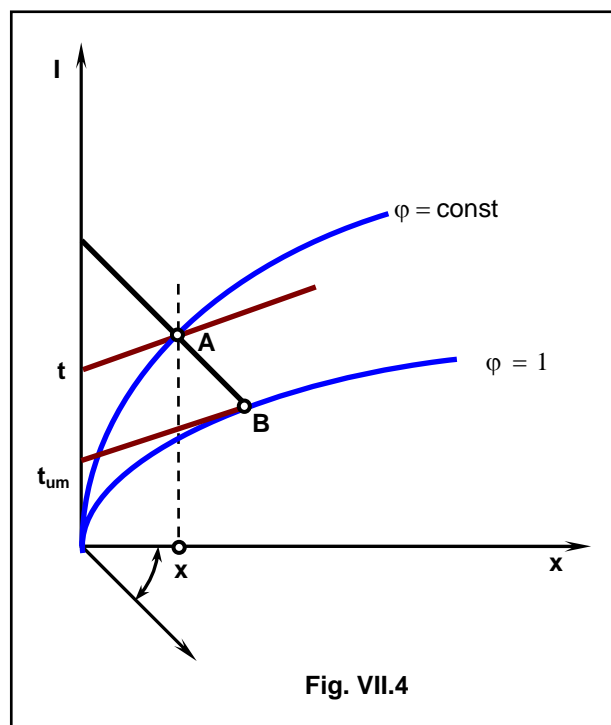
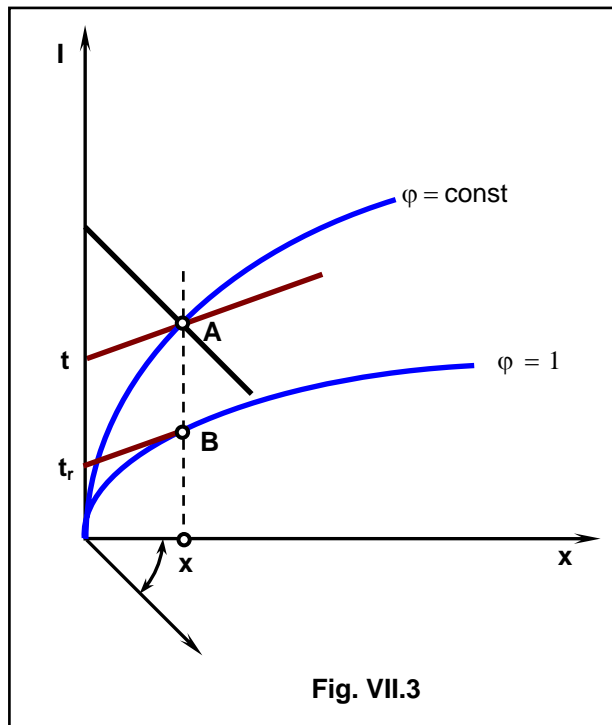


Fig. VII.2

e. Temperatura termometrului umed este un parametru care se refera tot la starea de gaz saturat cu vaporii umiditatii, dar in acest caz saturarea gazului se realizeaza prin umidificarea lui in contact cu un lichid, in conditii adiabactice. Umidificarea se face prin evaporarea lichidului ceea ce determina cresterea continutului de umiditate, x , si a umiditatii relative, φ , a amestecului. Pentru vaporizarea lichidului se consuma caldura, dar, umidificarea realizandu-se in conditii adiabactice aceasta caldura este furnizata de gaz, care se raceste. In aceste conditii cresterea umiditatii relative este determinata concomitent de cresterea continutului de umiditate si de scaderea temperaturii amestecului, iar perechea de parametrii, x si t se modifica astfel incat entalpia amestecului ramane constanta (nu se face schimb de caldura cu exteriorul). Prin urmare, pentru un gaz nesaturat cu vapori al caror parametrii sunt dati de un punct, A, **temperatura termometrului umed** va fi dat de izoterma care trece printr-un punct, B, care se afla la intersectia izoentalpei care trece prin punctul A, cu curba $\varphi = 1$ (fig.VII.4).



Denumirea de temperatura a termometrului umed vine de la un aparat pentru masurarea parametrilor gazelor umede denumit **psihrometru**, care este format, in principal, din doua termometre montate intr-o carcasa prin care este vehiculat gazul umed. Unul dintre termometre are bulbul invelit cu un bandaj textil umezit cu lichid. Prin trecerea gazului prin bandajul din jurul bulbului, acesta se satureaza cu vaporii lichidului, in conditii adiabactice si, prin urmare, termometrul va indica o temperatura a gazului saturat la $I = \text{constant}$, care a fost denumita **temperatura termometrului umed**. Celalalt termometru masoara temperatura actuala a gazului, motiv pentru care este denumit **termometrul uscat**.

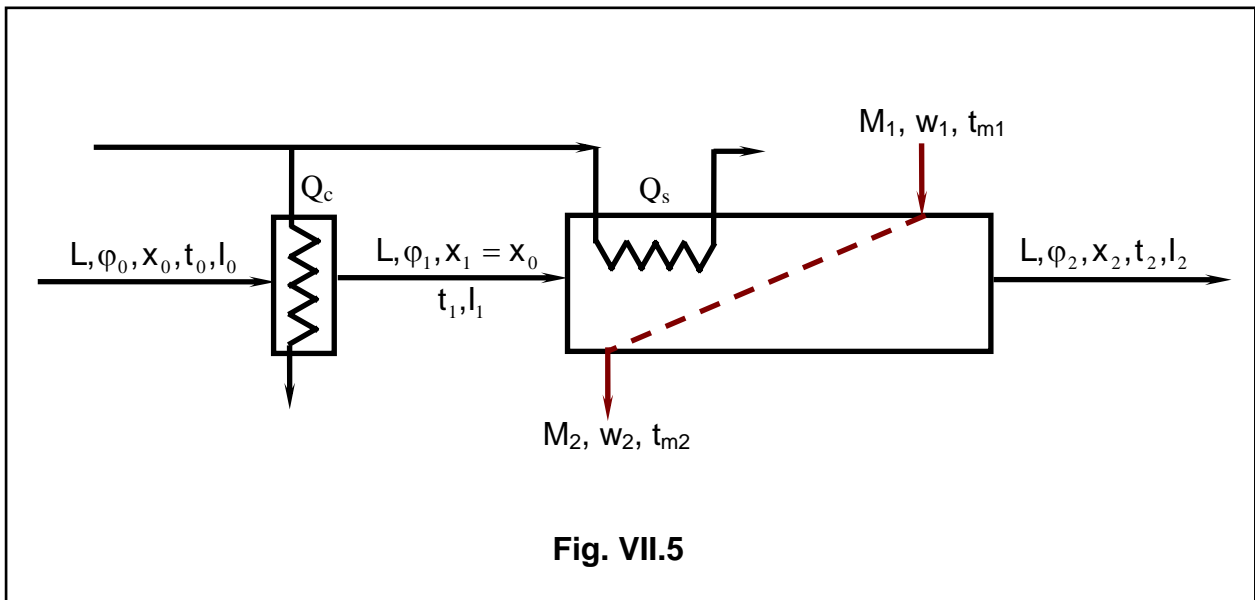
VII.1.2. Statica uscarii convective

Statica uscarii are ca obiectiv intocmirea bilanturilor de materiale si a bilantului termic. Din ecuatiile de bilant de materiale se determina necesarul de agent termic de uscare iar din bilantul termic se calculeaza caldura necesara uscarii, din care se determina suprafata de incalzire a caloriferului si cantitatea de agent termic de incalzire de la calorifer.

Pentru prezentarea acestor bilanturi se considera **varianta simpla** a uscarii denumita si **varianta normala**, in care agentul de uscare (denumit **agent proaspat** - un gaz, de obicei aerul) este incalzit intr-un calorifer exterior spatiului de uscare dupa care acesta trece peste materialul umed din uscator. Agentul de uscare dupa iesirea din uscator (denumit **agent epuizat**) nu mai este reutilizat la uscare. Schema de principiu a acestei

variante de uscare, precum si parametrii agentului de uscare si ai materialului supus uscarii, sunt prezentati in fig. VII.5. Semnificatia marimilor din fig. VII.5 este urmatoarea:

- L – debitul de aer absolut uscat, in Kg/s;
- x_0 – continutul de umiditate al agentului de uscare proaspat, in $\left[\frac{\text{Kg umiditate}}{\text{Kg gaz uscat}} \right]$;
- $x_1=x_0$ – continutul de umiditate al agentului de uscare la iesirea din calorifer si la intrarea in uscator, in $\left[\frac{\text{Kg umiditate}}{\text{Kg gaz uscat}} \right]$;



- x_2 – continutul de umiditate al agentului de uscare la iesirea din uscator (epuizat), in $\left[\frac{\text{Kg umiditate}}{\text{Kg gaz uscat}} \right]$;
- t_0 – temperatura agentului de uscare proaspat, in °C;
- t_1 – temperatura agentului de uscare la iesirea din calorifer, in °C;
- t_2 – temperatura agentului de uscare epuizat, in °C;
- φ_0 – umiditatea relativa a agentului de uscare proaspat;
- φ_1 – umiditatea relativa a agentului de uscare la iesirea din calorifer;
- φ_2 – umiditatea relativa a agentului de uscare epuizat;
- l_0 – entalpia agentului de uscare proaspat, in KJ/Kg aer uscat;
- l_1 – entalpia agentului de uscare la iesirea din calorifer, in KJ/Kg aer uscat;
- l_2 – entalpia agentului de uscare epuizat, in KJ/Kg aer uscat;
- M_1 – debitul (cantitatea) de material (umed) supus uscarii, in Kg/s sau Kg;

- M_2 – debitul (cantitatea) de material(uscat) iesit din uscator, in Kg/s sau Kg;
- w_1 – umiditatea materialului umed, in $\left[\frac{\text{Kg umiditate}}{\text{Kg material}} \right]$;
- w_2 – umiditatea materialului uscat, in $\left[\frac{\text{Kg umiditate}}{\text{Kg material}} \right]$;
- t_{m1} – temperatura materialului la intrarea in uscator, in °C;
- t_{m2} – temperatura materialului la iesirea din uscator, in °C;

VII.1.2.1. Bilanturi de materiale in uscarea convectiva

Din bilantul de materiale se calculeaza debitul de agent de uscare daca se cunoaste debitul de material umed, M_1 , si umiditatea acestuia, w_1 , si se impune umiditatea materialului la iesirea din uscator, w_2 . Debitul de umiditate indepartata din material in uscator, notat cu W , se coreleaza cu debitul de agent de uscare, L , deoarece umiditatea din material este preluata de agentul de uscare. Deoarece prin uscator circula doua fluxuri materiale, materialul si agentul de uscare, pentru fiecare dintrea acestea se intocmeste un bilant al umiditatii.

a. Bilantul umiditatii din material

Pentru materialul supus uscarii se poate intocmi bilantul global de materiale, dat de relatia:

$$M_1 = M_2 + W \quad \text{(VII.21)}$$

si un bilant al umiditatii, dat de relatia:

$$M_1 \cdot w_1 = M_2 \cdot w_2 + W \quad \text{(VII.22)}$$

Din relatiile (VII.21) si (VII.22) se exprima debitul de umiditate indepartata din material din uscator, W , obtinandu-se:

$$W = \frac{M_1(w_1 - w_2)}{1 - w_2} = \frac{M_2(w_1 - w_2)}{1 - w_1} \quad \text{(VII.23)}$$

b. Bilantul umiditatii din agentul de uscare

Pentru agentul de uscare se tine cont ca debitul de umiditate care pleaca din material prin uscare se regaseste in aerul care iese din uscator, si deci ecuatiile de bilant va fi data de relatia:

$$L \cdot x_0 + W = L \cdot x_2 \quad \text{(VII.24)}$$

din care:

$$W = L(x_2 - x_0) \quad (\text{VII.25})$$

iar debitul de agent de uscare va fi:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0} \quad (\text{VII.26})$$

Raportul:

$$I = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (\text{VII.27})$$

reprezinta **consumul specific de agent de uscare.**

VII.1.2.2. Bilantul termic in uscarea convectiva

Din bilantul termic se determina caldura totala consumata pentru uscare din care se calculeaza suprafata de schimb de caldura al caloriferului si debitul de agent termic de la calorifer.

Bilantul termic exprima legea conservarii energiei termice pentru sistemul macroscopic reprezentat de uscator. In regim stationar, forma generala a ecuatiei de bilant termic este data de relatia:

$$\Sigma Q_i = \Sigma Q_e \quad (\text{VII.28})$$

in care, ΣQ_i , reprezinta suma fluxurilor de caldura intrate in uscator iar ΣQ_e este suma fluxurilor de caldura iesite din uscator.

Tinand cont de notatiile de pe schema din fig. VII.5 se exprima explicit fluxurile de caldura intrate si iesite din uscator.

a. Fluxuri de caldura intrate in uscator:

- caldura preluata de aer in caloriferul principal, $Q_c = L(l_1 - l_0)$;
- caldura introdusa materialul umed, $M_1 \cdot c_{pm} \cdot t_{m1}$, in care, c_{pm} , este caldura specifica a materialului;
- caldura intrata in uscator cu transportorul materialului, $M_t \cdot c_{pt} \cdot t_{ti}$;
- caldura introdusa in uscator de agentul de uscare proaspat, $L \cdot l_0$;
- caldura data in uscator de caloriferul secundar (daca exista), Q_s .

a. Fluxuri de caldura iesite din uscator:

- caldura iesita din uscator cu materialul uscat, $M_2 \cdot c_{pm} \cdot t_{m2}$;
- caldura iesita in uscator cu transportorul materialului, $M_t \cdot c_{pt} \cdot t_{tf}$;
- caldura iesita din uscator cu agentul de uscare epuizat, $L \cdot l_2$;
- caldura pierduta in mediul ambiant, Q_p .

Prin urmare forma explicitata a ecuatiei (VII.28) este:

$$Q_c + Q_s + L \cdot l_0 + M_1 \cdot c_{pm} \cdot t_{m1} + M_t \cdot c_{pt} \cdot t_{ti} = L \cdot l_2 + M_2 \cdot c_{pm} \cdot t_{m2} + M_t \cdot c_{pt} \cdot t_{tf} + Q_p \quad (\text{VII.29})$$

Din bilantul global al umiditatii din material rezulta ca $M_1 = M_2 + W$. Inlocuind pe M_1 in relatia (VII.29), rezulta:

$$Q = Q_c + Q_s = L(l_2 - l_0) + M_2 \cdot c_{pm}(t_{m2} - t_{m1}) + M_t \cdot c_{pt}(t_{tf} - t_{ti}) - W \cdot c_{pm} \cdot t_{m1} + Q_p \quad (\text{VII.30})$$

Impartind relatia (VII.30) prin W se obtine o noua relatie in care toti termenii au semnificatia unui **consum specific de caldura**, $q = Q/W$:

$$q = q_c + q_s = l(l_2 - l_0) + \frac{M_2 \cdot c_{pm}(t_{m2} - t_{m1})}{W} + \frac{M_t \cdot c_{pt}(t_{tf} - t_{ti})}{W} - c_{pm} \cdot t_{m1} + \frac{Q_p}{W} \quad (\text{VII.31})$$

Daca se noteaza cu:

$$q_m = \frac{M_2 \cdot c_{pm}(t_{m2} - t_{m1})}{W}; \quad q_t = \frac{M_t \cdot c_{pt}(t_{tf} - t_{ti})}{W} \quad \text{si cu } q_p = \frac{Q_p}{W}, \text{ din relatia (VII.31)}$$

rezulta:

$$q_c = l(l_2 - l_0) + q_m + q_t - c_{pm} \cdot t_{m1} + q_p - q_s \quad (\text{VII.32})$$

In relatia (VII.32) se noteaza suma:

$$q_m + q_t - c_{pm} \cdot t_{m1} + q_p - q_s = -\Delta \quad (\text{VII.33})$$

si relatia (VII.32) devine:

$$q_c = l(l_2 - l_0) - \Delta \quad (\text{VII.34})$$

Valoarea lui Δ depinde in principal de caldura furnizata agentului de uscare de caloriferul secundar, q_s . Daca :

$$q_s = q_m + q_t - c_{pm} \cdot t_{m1} + q_p$$

rezulta ca $\Delta = 0$ si relatia (VII.32) devine:

$$q_c = l(l_2 - l_0) \quad (\text{VII.35})$$

Dar caldura primita de agentul de uscare in caloriferul principal determina cresterea entalpiei acestuia de la l_0 la l_1 , astfel incat :

$$q_c = l(l_1 - l_0) \quad (\text{VII.36})$$

Prin urmare, din relatiile (VII.35) si (VII.36) rezulta ca : $l(l_1 - l_0) = l(l_2 - l_0)$, adica $l_1 = l_2$, ceea ce inseamna ca in aceasta situatie uscarea se face la entalpie constanta. Uscatorul in care entalpia agentului de uscare nu se modifica in timpul uscarii se numeste **uscator teoretic** sau **uscator ideal**. Uscarea in uscatorul teoretic este prezentata in fig. VII.6.

In cazul in care $\Delta \neq 0$ se spune ca uscatorul **este real**. Pentru uscatorul real din relatiile (VII.34) si (VII.36) rezulta ca:

$$l(l_1 - l_0) = l(l_2 - l_0) - \Delta \quad (\text{VII.37})$$

sau:

$$l_2 - l_1 = \frac{\Delta}{l} \quad (\text{VII.38})$$

Raportul $\frac{\Delta}{l}$ are dimensiunile unei entalpii si poate avea valori pozitive sau negative, in functie de semnul lui Δ . Sunt posibile doua situatii:

a. $\Delta > 0$, atunci cand $q_s > q_m + q_t - c_{pm} \cdot t_{m1} + q_p$, adica atunci cand caldura furnizata in caloriferul secundar depaseste toate pierderile de caldura. In aceasta situatie din relatia (VII.38) rezulta ca $l_2 > l_1$, adica entalpia agentului de uscare creste la trecerea prin uscator.

b. $\Delta < 0$, atunci cand $q_s < q_m + q_t - c_{pm} \cdot t_{m1} + q_p$. Aceasta situatie se intalneste atunci cand lipseste caloriferul secundar ($q_s = 0$) sau in cazul in care caldura furnizata de acesta nu este suficienta pentru a acoperi toate pierderile. Daca $\Delta < 0$, conform relatiei (VII.38), rezulta ca $l_2 < l_1$, adica uscarea se realizeaza cu scaderea entalpiei agentului de uscare la trecerea prin uscator. Reprezentarea uscarii in diagrama I-x este prezentata in fig.VII.7, pentru cazul $\Delta > 0$, respectiv in fig.VII.8, pentru cazul $\Delta < 0$.

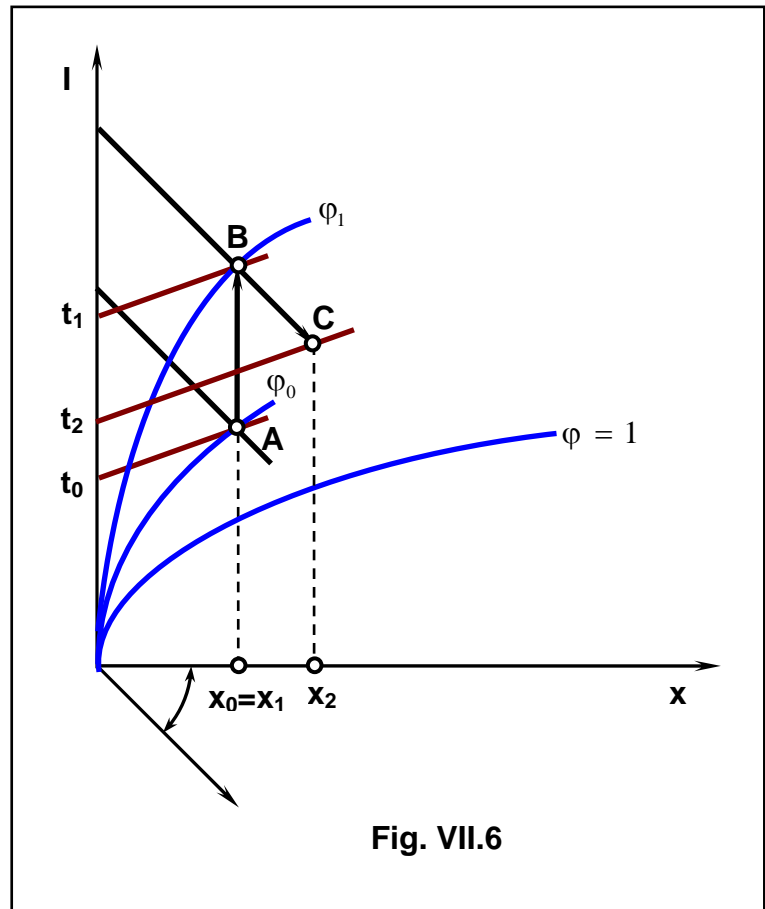
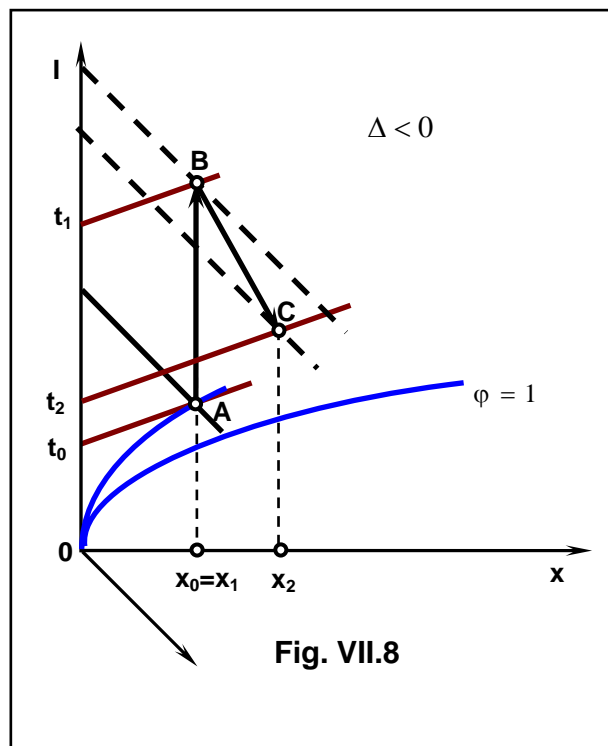
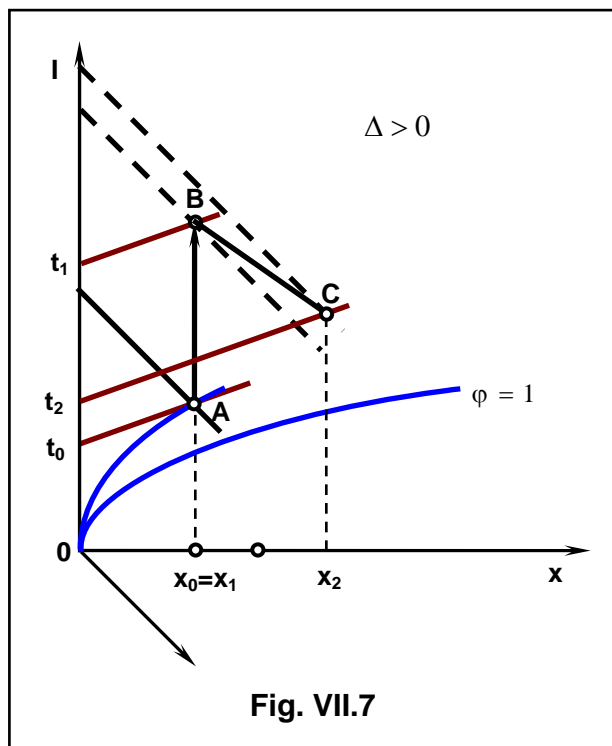


Fig. VII.6



VII.1.2.3. Variantele uscarii

Unele materiale nu suporta conditii mai “drastice” de uscare, caracterizate prin temperaturi ridicate si prin continut de umiditate redus al agentului de uscare. Din aceasta categorie fac parte si unele produse din piele, produse textile si alte produse care se pot degrada sau deforma daca parametrii agentului de uscare nu sunt bine alesi. Astfel de materiale necesita conditii mai “blande” de uscare care pot fi realizate folosind diferite variante ale uscarii dintre care mai importante sunt: **uscarea cu incalzirea intermediara a agentului de uscare** si **uscarea cu recircularea partiala a agentului de uscare**. In afara de aceste variante se pot utiliza si variante combinate ale acestora. De exemplu un uscator poate combina recircularea partiala a agentului de uscare cu incalzirea lui intermediara.

VII.1.2.3.1. Uscarea cu incalzirea intermediara a agentului de uscare

In aceasta varianta caldura totala necesara uscarii nu este data toata in caloriferul principal. Uscatorul este impartit in mai multe zone iar intre zone sunt dispuse calorifere care reincalzesc agentul de uscare dupa fiecare zona. Se demonstreaza ca in acest mod uscarea se poate realiza la o temperatura mult mai mica decat in varianta normala si din acest motiv metoda este recomandata pentru produse care nu suporta temperaturi ridicate. Schematic o varianta cu doua incalziri intermediare este prezentata in fig. VII.9 iar variatia parametrilor agentului de uscare, pentru un uscator teoretic, este redada in fig. VI.10.

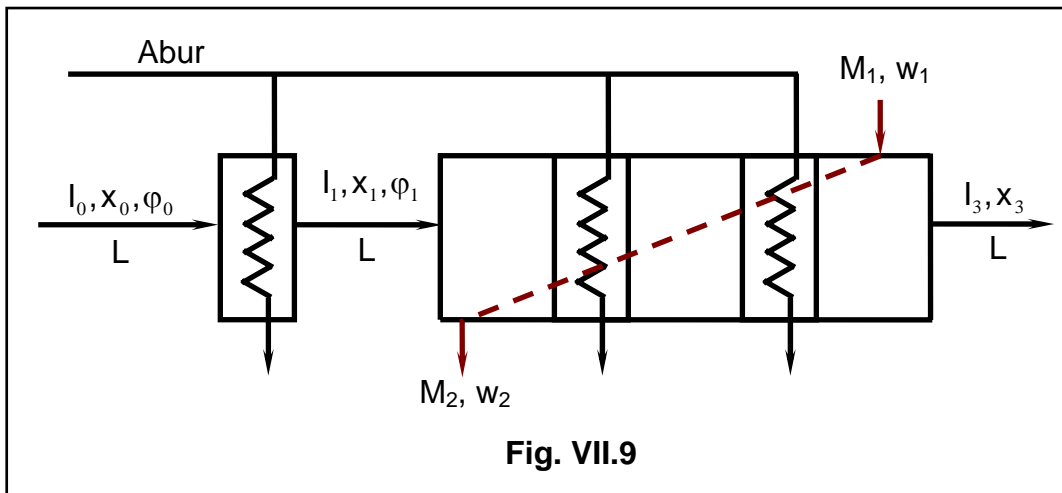


Fig. VII.9

Se demonstreaza ca in aceasta varianta consumul de caldura este acelasi ca si in varianta normala, astfel: caldura totala consumata la uscator este data de suma caldurilor de la caloriferul principal si de la cele doua calorifere secundare:

$$Q = Q_c + Q_1 + Q_2 \quad \text{(VII.39)}$$

dar:

$$Q_c = L(I_1 - I_0) \quad \text{(VII.40)}$$

$$Q_1 = L(I_2 - I_1) \quad \text{(VII.41)}$$

$$Q_2 = L(I_3 - I_2) \quad \text{(VII.42)}$$

si deci:

$$Q = L(I_1 - I_0 + I_2 - I_1 + I_3 - I_2) = L(I_3 - I_0) \quad \text{(VII.43)}$$

Daca uscarea s-ar face dupa varianta normala, pentru indepartarea aceleiasi cantitati de umiditate din material agentul de uscare ar fi trebuit incalzit in caloriferul principal pana la o temperatura $t'_1 > t_1$, corespunzatoare punctului B' din fig.VII.10, la care entalpia acestuia avea valoarea I_3 . Prin urmare daca s-ar fi utilizat varianta normala consumul de caldura la caloriferul principal ar fi fost dat de relatia:

$$Q = L(I_3 - I_0) \quad \text{(VII.44)}$$

care este egala cu suma caldurilor la cele trei calorifere din varianta cu incalzirea intermediara a agentului de uscare. Tot din fig. VII.10 se poate observa ca in aceasta

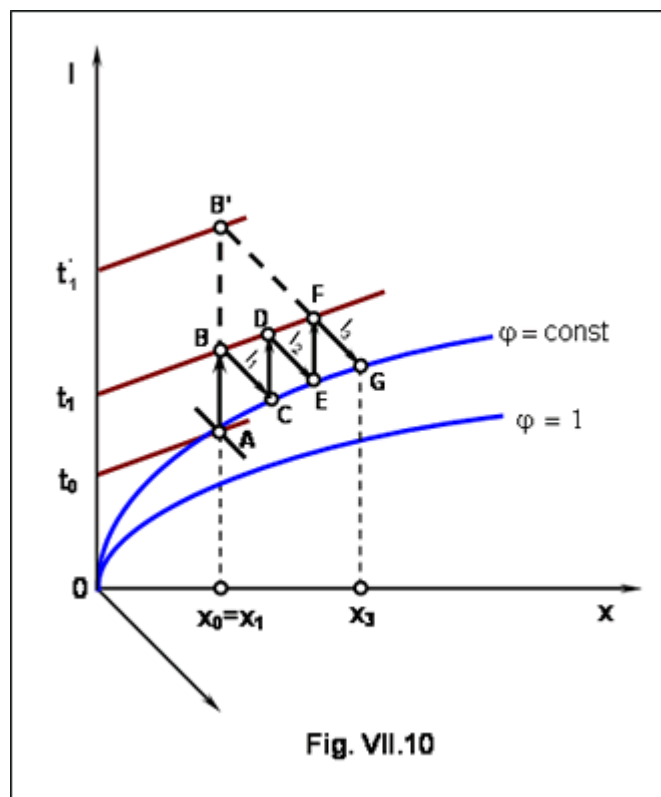


Fig. VII.10

varianta temperatura la iesirea din fiecare calorifer, t_1 , este cu mult mai mica decat in varianta normala.

VII.1.2.3.2. Uscarea cu recircularea partiala a agentului de uscare

Sunt materiale care nu suporta potentiale de uscare ridicate deoarece ar putea suferi unele deformari care ar dauna asupra calitatii produsului. Un astfel de material este si pielea care se contracta in timpul uscarii, ceea ce cauzeaza si o pierdere de suprafata. Pentru a se evita astfel de fenomene se recomanda ca agentul de uscare sa aiba un continut de umiditate mai mare. Cresterea umiditatii agentului de uscare la intrarea in uscator se poate face fie prin umidificarea acestuia prin injectie de abur fie prin amestecarea agentului proaspat cu o parte din agentul de uscare epuizat. A doua solutie constituie **varianta de uscare cu recircularea partiala a agentului de uscare**, prezentata schematic in fig. VII.11.

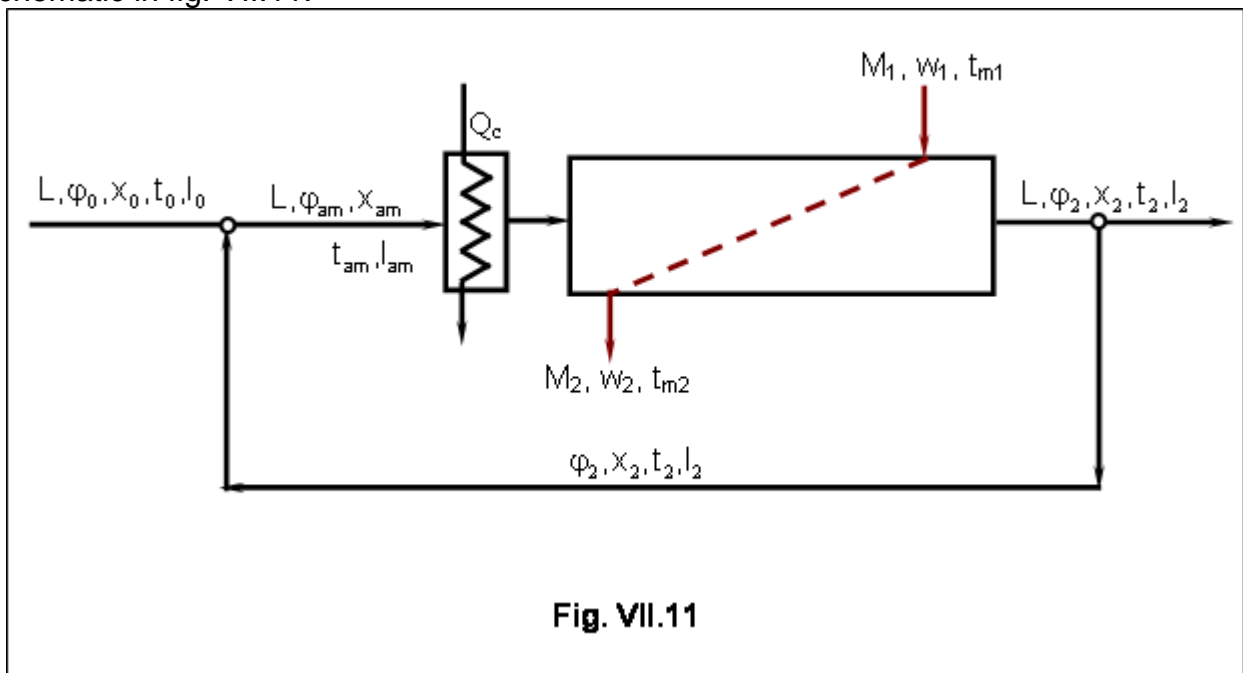


Fig. VII.11

Din fig. VII.11 rezulta ca in aceasta varianta, agentul proaspat este amestecat cu o parte din cel epuizat inainte ca amestecul astfel format sa intre in caloriferul principal. Prin amestecare rezulta un agent de uscare cu un continut mai mare de umiditate care nu se modifica prin incalzirea din caloriferul principal. Parametrii agentului de uscare in aceasta varianta sunt prezentati in fig. VII.12. Proprietatile amestecului inainte de intrarea in caloriferul secundar sunt date de un punct, D, aflat pe linia de amestec \overline{AC} , care uneste punctul A, care da parametrii agentului proaspat, si punctul C, care da parametrii agentului epuizat. Pozitia punctului D depinde de raportul de amestec dintre agentul epuizat si cel proaspat.

Daca se noteaza cu n fractia de agent recirculat din amestecul format cu agentul proaspat, entalpia, respectiv continutul de umiditate al amestecului se poate determina din relatiile:

$$I_{am} = n \cdot I_2 + (1-n) \cdot I_0 \quad (\text{VII.45})$$

$$x_{am} = n \cdot x_2 + (1-n) \cdot x_0 \quad (\text{VII.46})$$

Intersectand izoentalpa, I_{am} , sau verticala, x_{am} , cu linia de amestec \overline{AC} se obtin punctul D. Segmentul \overline{DE} reprezinta incalzirea amestecului in caloriferul principal iar segmentul \overline{EC} reprezinta uscare la entalpie constanta (in uscatorul teoretic). Din fig. VII.12 rezulta ca in aceasta varianta uscarea se realizeaza nu numai la un continut de umiditate, x_{am} , mai mare ci si la o temperatura, t_1' , mai scazuta decat in varianta normala.

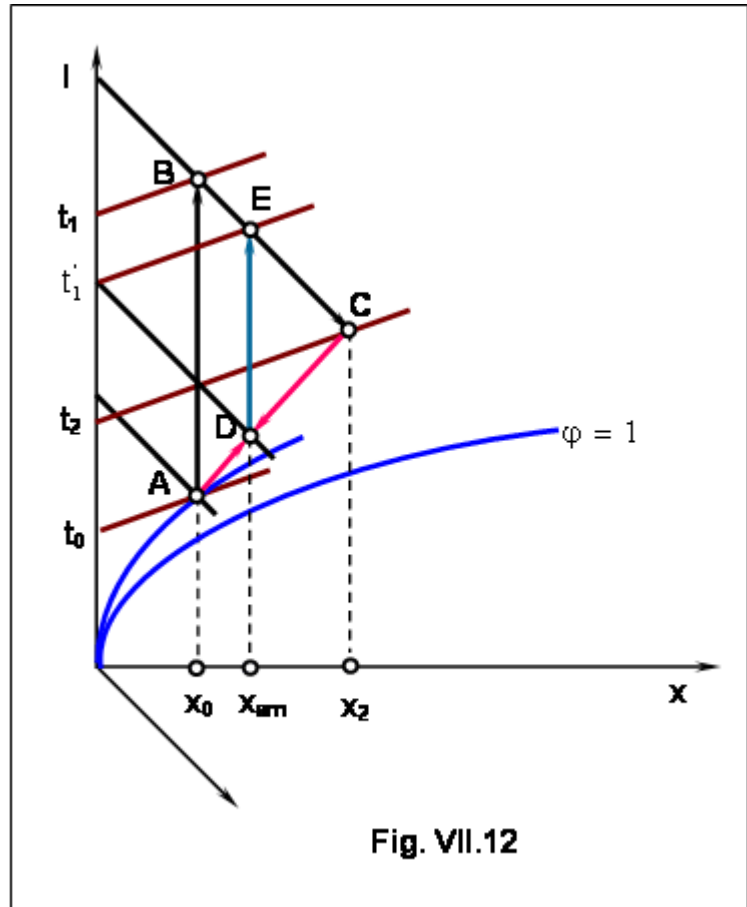


Fig. VII.12

VII.1.3. Cinetica uscarii convective

Cinetica uscarii studiaza variatia in timp a umiditatii si temperaturii materialului supus uscarii. Modificarea umiditatii materialului in timpul uscarii este cauzata de transferul de caldura si de masa dintre material si agentul de uscare. O marime importanta in caracterizarea cineticii uscarii este **viteza de uscare**, u , definita ca fiind cantitatea de umiditate indepartata din material in unitatea de timp de pe unitatea de suprafata:

$$u = \frac{dW}{A \cdot dt} \quad (\text{VII.47})$$

Daca se noteaza cu M_u , cantitatea de material absolut uscat din materialul umed si cu w' , umiditatea materialului raportata la substanta uscata, bilantul umiditatii din material se poate exprima si prin relatia:

$$dW = -M_u \cdot dw' \quad (\text{VII.48})$$

si relatia (VII.47) se poate scrie si in forma:

$$u = - \frac{M_u \cdot dw'}{A \cdot dt} \quad (\text{VII.49})$$

VII.1.3.1. Curbele uscarii

Studiile de cinetica a uscarii presupun masurarea experimentală a variației în timp a umidității și temperaturii materialului supus uscării. Datele experimentale, obținute în laborator pe esanțioane din material, sunt prelucrate sub forma unor grafice cunoscute generic sub numele de **curbele uscării**. Principalele curbe ale uscării sunt:

- variația în timp a umidității materialului (fig.VII.13);
- variația în timp a vitezei de uscare;
- variația vitezei de uscare în funcție de umiditatea materialului (fig.VII.14);
- variația temperaturii materialului în funcție de umiditatea lui.

În fig.VII.13 este prezentată variația umidității materialului în timp. Porțiunile din curba uscării corespund unor perioade ale uscării:

- **AB** – perioada de intrare în regim;
- **BC** – perioada de uscare cu viteză constantă;
- **CDE** – perioada de uscare cu viteză descrescătoare.

Perioadele uscării pot fi analizate mai intuitiv în diagrama care da variația vitezei de uscare în funcție de umiditatea materialului, prezentată în fig.VII.14. În perioada corespunzătoare segmentului AB materialul se încălzește până la temperatura regimului de lucru, dat de parametrii uscătorului. Această perioadă este relativ scurtă și poate fi neglijată în durata totală a uscării.

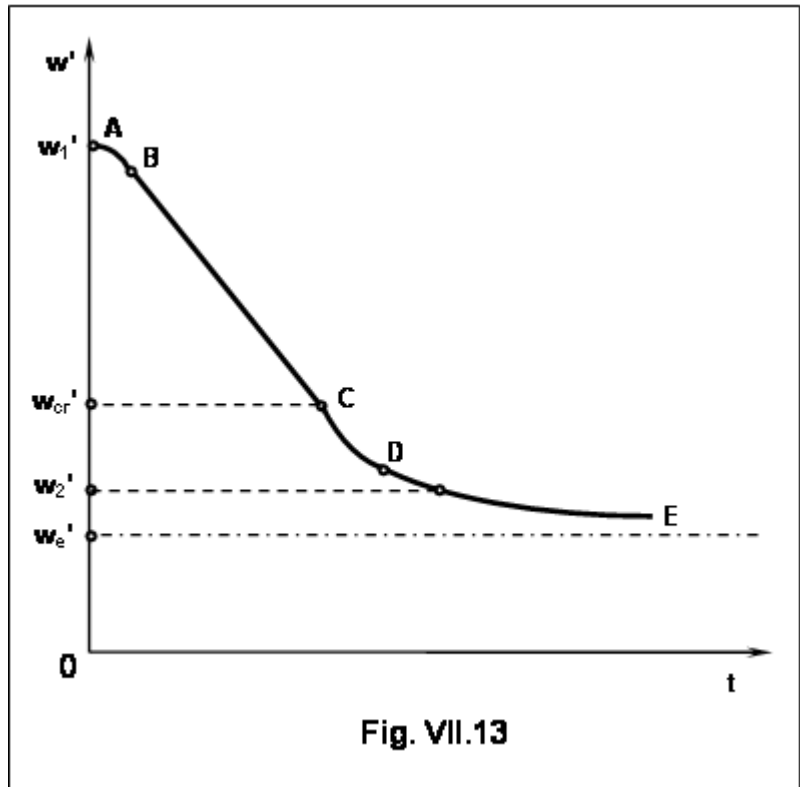


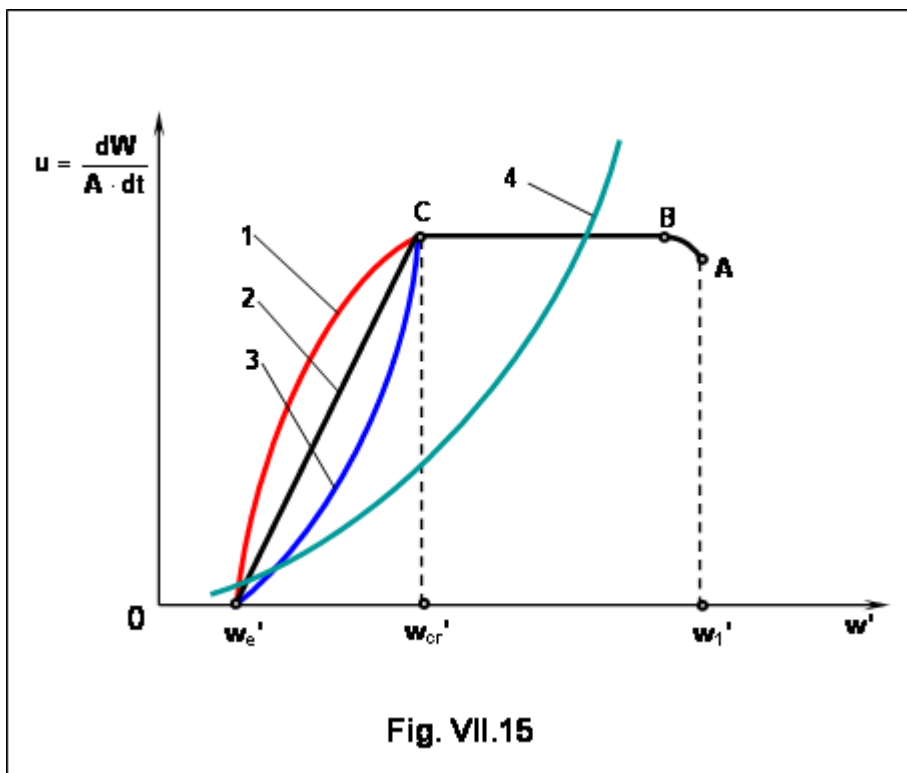
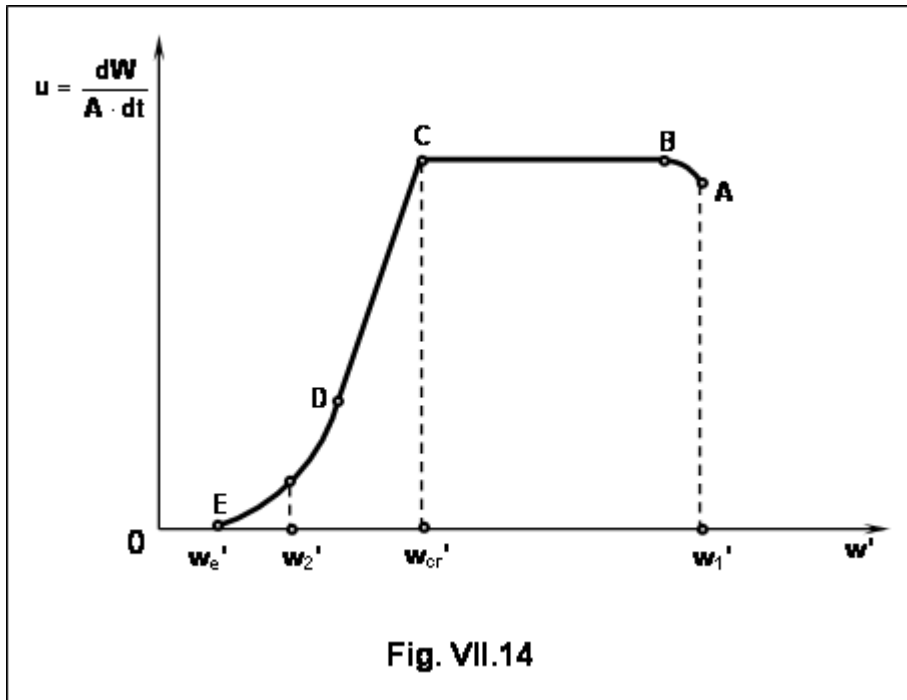
Fig. VII.13

Segmentul BC, paralel cu abscisa, corespunde **perioadei de uscare cu viteză constantă**. În această perioadă materialul este acoperit cu umiditate liberă și deci în timpul uscării se produce o evaporare a lichidului cu viteză constantă a cărei valoare depinde de condițiile în care se realizează transferul de caldura și de masă între lichid și agentul de uscare, transfer influențat de temperatura și viteză agentului de uscare și de potențialul uscării. În punctul **C**, denumit și **punct critic** apare primul punct uscat pe suprafața materialului. Din

acest moment suprafata acoperita cu umiditate libera scade ceea ce determina si scaderea vitezei de uscare, iar uscarea intra in faza urmatoare, denumita **perioada de uscare cu viteza descrescatoare**. La inceputul acestei perioade viteza de uscare scade liniar pana

in punctul **D** care corespunde momentului in care intreaga umiditate libera a fost indepartata din material. Incepand cu punctul **D** se produce uscarea cu viteza descrescatoare neliniara. Din acest moment, suprafata de evaporare se deplaseaza in interiorul materialului, ceea ce determina o rezistenta suplimentara la difuzia vaporilor de la material in agentul de uscare, fapt ce explica scaderea neliniara a vitezei de uscare pe portiunea **DE** a curbei de uscare.

In perioada de uscare cu viteza descrescatoare variatia vitezei de uscare depinde de natura si structura materialului supus uscarii. In fig.VII.15 este prezentata comportarea unor materiale, in aceasta perioada a uscarii. Curba (1) corespunde unor **materiale partial higroscopice**, curba (3) unor **materiale higroscopice** iar curba (4) unor materiale care nu au perioada de uscare cu viteza constanta, cum ar fi



unele geluri.

VII.1.3.2. Durata uscarii

Durata uscarii se calculeaza pentru fiecare dintre cele doua perioade principale ale uscarii.

a. Pentru perioada de uscare cu viteza constanta

Ecuatia care defineste viteza de uscare (VII.49) este o ecuatie diferentiala ordinara, cu variabile separabile. Deoarece in aceasta perioada viteza de uscare este constanta si are valoarea maxima, $u = u_{\max} = \text{const}$, dupa separarea variabilelor in ec.VII.49 si integrare intre limitele care corespund acestei perioade, se obtine:

$$\int_0^{t_1} dt = -\frac{M_u}{A} \int_{w_1'}^{w_{cr}'} \frac{dw'}{u_{\max}} \quad (\text{VII.50})$$

deci:

$$t_1 = \frac{M_u}{A \cdot u_{\max}} (w_1' - w_{cr}') \quad (\text{VII.51})$$

b. Pentru perioada de uscare cu viteza descrescatoare

In aceasta perioada viteza de uscare nefiind constanta relatia care da durata de uscare este:

$$t_2 = -\frac{M_u}{A} \int_{w_{cr}'}^{w_2'} \frac{dw'}{u} \quad (\text{VII.52})$$

Integrala din relatia (VII.52) se poate rezolva grafic, folosind diagrama uscarii care da variatia vitezei de uscare in functie de umiditatea materialului.

Cunoscand duratele celor doua perioade ale uscarii, durata totala a uscarii va fi:

$$t = t_1 + t_2 \quad (\text{VII.53})$$