

ASPECTE TEORETICE ALE FENOMENELOR DE TRANSFER ÎN PROCESELE DE USCARE

M. Bernic

Universitatea Tehnică a Moldovei

Procesele de uscare ale produselor agricole, în particular oleaginoase, sunt procese complexe, bazate pe fluxuri termodinamice. Aceste fluxuri (de temperatură, umiditate, concentrație, presiune ș.a.) sunt funcții ale transferului de substanță, de energie sau de impuls.

În procesului de uscare a produselor complexe eterogene, cum sunt cele agroalimentare, transferul de masă are loc nu numai datorită difuziei sau conductibilității termice în parte, dar și ca rezultat al interacțiunii acestor fenomene. Astfel, la încălzirea artificială a produsului, eliminarea umidității este consecința difuziei termice. La rândul său, aportul difuziei termice asupra procesului este influențat și de efectul de adsorbție.

În procesele de uscare, la deplasarea umidității în diferite câmpuri termice nestaționare din produs, se observă fenomenul viscozității sau a frecării interne. Acest fenomen influențează mult viteza fluxului de umiditate. Toate aceste fenomene stau la baza apariției forțelor motrice (gradientul de presiune, de masă, de presiune ș.a.) ale transferului de căldură și de masă în procesul de uscare.

Un mare aport în studiul teoretic al forțelor motrice a fenomenelor de transfer și a interacțiunii dintre ele au adus școlile marilor savanți L. Onsager, K. Denbig, S de Grott, I. Prigojin ș.a. [1, 2, 3, 4]. Valoarea acestor forțe motrice este bine determinată de principiile de linearitate și de reversibilitate ale teoriei proceselor ireversibile Onsager.

Conform principiului linearității Onsager, se admite, că la devieri neînsemnate ale sistemului de la echilibru există o relație liniară dintre fluxurile J_i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) și forțele termodinamice X_j ($j = 1, 2, 3, \dots, m$) [1, 2].

$$J_i = \sum_{j=1}^m L_{ij} X_j \quad (1)$$

Coeficienții L_{ij} sunt numiți fenomenologici sau cinetici. Ei pot fi nediagonali (L_{ij}) sau diagonali (L_{ii} și L_{jj}). Componentii „nediagonali” din ecuația (1.) sunt incluși de către Onsager pentru a lua în considerație diferite efecte (termodifuzic, electrodifuzic, termoelectric, etc.) care sunt rezultatul „unor suprapuneri” interacțiunii ale câtorva procese ire-

versibile, ce au loc concomitent în unele și aceleași coordonate spațiale. Ei pot fi orișicare funcție a parametrilor de stare (temperatura, concentrația, presiunea ș.a.), dar în același timp nu depind de J_i și X_j și caracterizează conductibilitatea sistemului în raport cu fluxul J_i .

Valoarea X_i este dependentă de procesul descris. Astfel, pentru efectul difuziei, în calitate de parametru X_i se folosește umiditatea relativă, iar coeficientul de transfer L_{ij} este Coeficientul de difuzie D . Pentru cazul conductibilității termice, în calitate de X_i se folosește energia mișcării termice a moleculei, iar L_{ij} este coeficientul conductibilității termice λ . La descrierea fenomenului viscozității parametrul X_i este impulsul mișcării ordonate a moleculelor, iar L_{ij} – coeficientul viscozității η .

Principiul de reversibilitate postulează simetria elementelor matricei L prin relația:

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (2)$$

Relația (2) indică prezența unei simetrii la interacțiunea reciprocă a fluxurilor.

Aceste relații au fost obținute în baza mecanicii statistice ale reversibilității microproceselor în timp, cu condiția, că coeficienții L_{ij} și L_{ji} sunt constanți, iar fluxurile J_i și J_j sunt independente linear și devin nule la dispariția forțelor X_i și X_j .

Relațiile (1 și 2) sunt consecință a primelor principii ale termodinamicii de neechilibru și de aceea poartă un caracter universal. Aceasta mărește valoarea lor și le face un bun instrument pentru analiza interacțiunii diferitor procese din mediul real.

Este de menționat, că din momentul apariției teoriei L. Onsager (1931) știința a trecut de la studiul unui sau altui fenomen ale unui oarecare proces a sistemelor deschise, la studiul fenomenelor apărute la intersecția a mai multor procese. Aceasta, cum constată [8, 9], a influențat apropierea a unui șir întreg de discipline: termodinamica și teoria schimbului de căldură și de masă, hidrodinamica și electrodinamica, mecanica solidelor și cinetica fizică ș.a.

Astfel, dacă lucrul real al unui oarecare sistem independent se determina cu forța rezultantă al unui proces, apoi în continuare poate fi luat în considerație un șir întreg de procese. În acest caz, conform legii Kiuri, principiul simetriei devine inutil și

forțele rezultante ale proceselor pot fi precăutate ca reciproce și corelate. Este vorba despre analogia proceselor și nici de cum despre reversibilitatea lor, ce contrazice teoriei Onsager. Astfel, conform ecuației (1) multiplele efecte: termomecanic, termoelectric, termodifuzic ș.a. sunt tratate de Onsager și discipolii lui prin interacțiunea vitezelor proceselor ireversibile sub acțiunea forței rezultante constante, care, după cum menționează [3, 4] nu este adecvat. Conform afirmațiilor savantului Ațkin V. [4], cauza apariției acestor efecte ca consecința suprapunerii forțelor rezultante variabile, astfel cum se petrece în mecanică (accelerarea și frecarea), în electrodinamică (curentul electric, conductibilitatea electrică, rezistența electrică ș.a.).

În sistema deschisă, în orice punct material al ei, rezultantele forțelor sunt dependente de parametrii acestui punct (temperatură, presiune, concentrație ș.a.). Deci, în acest caz este adecvată relația [4]:

$$J_i = L_{ii} \sum X_i = L_{ii} \sum X_{ij} \quad (3)$$

în care X_{ij} sunt componentele forței rezultante, $X_i = \sum X_{ij}$;

L_{ii} – coeficienți fenomenologici, care în comparație cu (1.) pot fi funcții arbitrare a forțelor termodinamice $L_{ii} = L_{ii}(X_{ij})$ și parametrilor termodinamici (temperatură, presiune, concentrație ș.a.).

În comparație cu legea Onsager (1), ecuația de transfer „pe diagonală” (3) nu necesită ca coeficienții L_{ii} să fie constanți și de aceea ei sunt adecvați pentru cazuri mai generale ale proceselor neliniare.

Nivelul de linearitate a coeficienților fenomenologici se apreciază cu formula [4]:

$$L_{ij} = L_{ii}(X_{ij}, X_j) \quad (4)$$

Deoarece acești parametri sunt ca regulă nestaționari, apoi și coeficienții fenomenologici L_{ii} din ecuația Onsager poartă un caracter neliniar. Deci, apar legături noi, ne luate în considerație dintre coeficienții diagonali L_{ij} și încrucișați L_{ij} [5]. Totodată, funcțiile legăturilor dintre coeficienții cinetici $L_{ii}L_{ij}(x_{ij})$ și parametrii termostatici (temperatură, presiune, concentrație, ș.a.) pot fi diferite, inclusiv și liniare. Astfel, coeficienții fenomenologici L_{ii} în legile Fourier, Newton, Ohm, Fick nu sunt constanți și nici liniari.

Unele din fenomenele de bază care pot fi descrise cu postulatele Onsager sunt fenomenele de transfer de căldură și de masă ale proceselor de uscare a materialelor umede, inclusiv a produselor agrare oleaginoase. Aceste transferuri cuprind atât

mediul intern al materialului umed, cât și cel extern, în care se află materialul propriu zis.

Uscarea materialelor umede compuse eterogene este un proces tehnologic complex, scopul căreia este nu numai păstrarea proprietăților calitative înalte a produsului, dar și în unele cazuri ameliorarea lor. La trecerea apei dintr-o fază în alta, procesul de uscare este însoțit de un consum enorm de energie.

În majoritatea cazurilor intensitatea procesului de uscare este determinată de viteza deplasării umidității din straturile interne ale materialului către cele periferice. Multiple cercetări au demonstrat, că procesul în cauză fiind determinat de structura și compoziția materialului, de energia și forma legăturii umidității cu scheletul materialului, etc. este greu de dirijat și modest studiat [6, 7]. De aceea, la alegerea noilor metode de uscare, de importanță majoră este influența corectă a transferului de masă din interiorul produsului.

Conform termodinamicii proceselor ireversibile, legea transferului de masă în materialele umede supuse procesului de uscare prin convecție poate fi prezentată ca:

$$J_m = -D_m \rho_0 \nabla u - D_m \rho_0 \delta \nabla t \quad (5)$$

în care D_m – coeficientul difuziei, în m^2/s ;

δ – coeficient al gradientului de temperatură, în $grad^{-1}$;

∇u și ∇t – gradientii de umiditate și de temperatură (forțele motrice);

ρ_0 – densitatea substanței uscate, în kg/m^3 .

Din (5) se observă, că gradientul de temperatură împiedică deplasarea umidității în direcția straturilor periferice ale produsului. Studiul savanților Rogov I.A., Jmakin N.P., Lupașco A.S., Musteața V.T., Malejic I.F. ș.a. a arătat, că o intensificare suplimentară a procesului de uscare poate fi realizată prin aplicarea metodelor netradiționale ale aportului de energie, cum sunt câmpurile electromagnetice. La încălzirea în volum un rol important îl joacă gradientul de presiune (∇P).

Pentru această metodă de încălzire viteza de aplicare a căldurii în produs crește esențial și provoacă o degajare intensivă de abur. Evaporarea aburului are loc în tot volumul materialului, dar cum menționează [7, 8], în centru mai intensiv, iar la periferie mai slab. Aceasta se datorează temperaturii mai avansate din centrul produsului. Ca rezultat, apare gradientul de presiune ∇P , care și este forța motrice principală a transferului aburului prin produs la aplicarea câmpurilor electromagnetice.

În lucrarea sa, Lîcov A [9] afirmă, că în câmp electromagnetic are loc și difuzia electrică, deci (1.5) v-a obține forma:

$$J_m = -D_m \rho_0 \nabla u - D_m \rho_0 \delta \nabla t - K_p \nabla P - D_m^e \rho_0 \hat{E} \quad (6)$$

în care $K_p \nabla P$ este transferul de masă sub acțiunea gradientului de presiune;

$D_m^e \rho_0 \hat{E}$ este transferul de masă cauzat de către difuzia electrică.

Gradul de influență a fiecărui din gradientii indicați în ecuația (6) este determinat de metoda de aplicare a energiei, valoarea fluxului de energie, structura materialului, compoziția chimică, starea termică, proprietățile termofizice.

După cum s-a menționat anterior și reieșind din (6), la încălzirea materialelor umede în câmp electromagnetic, în zona centrală a produsului umiditatea se transformă în aburi, formându-se astfel gradientul de presiune ∇P . Influența acestui gradient este atât de puternică, încât o parte de umiditate este deplasată prin capilare în straturile periferice în formă lichidă. Evaporarea acestei umidități de pe suprafața materialului poate fi realizată la aplicarea fluxurilor de masă și de căldură prin convecție. Procesul înlăturării umidității de pe suprafața materialului se supun legilor transferului în gaze. Aceste procese sunt descrise în teoria cinetică-moleculară în gaze.

La descrierea fluxurilor termodinamice se admite, că în mediu nu au loc perturbații macroscopice și transferul se realizează numai grație mișcării dezordonate a particulelor mediului. Însă, în gazul real și lichid aceste perturbații ca regulă sunt prezente.

Lîcov A.V. bazându-se pe legile de păstrare a energiei și masei [9] a obținut sistemul de ecuații diferențiale al transferului de masă și de căldură în produsele umede la deplasarea în material a fluxului de lichid și aburi prin convecție (presiunea fiind admisă constantă):

$$c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\text{div} J_q + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (7)$$

$$c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\text{div} J_m \quad (8)$$

în care c este capacitatea termică specifică a materialului, în J/kg·K;

r – căldura de vaporizare, în kJ/kg;

ε – criteriul transformărilor de fază.

În ecuația (7) al doilea membru prezintă fluxul de masă creat în urma difuziei interne și externe. Difuzia internă se combină din convecția naturală și artificială.

Fenomenul convecției naturale apare în gaze și lichide datorită câmpului forței de greutate. Acțiunea acestui câmp se evidențiază esențial la încălzirea umidității din partea inferioară, iar răcirea

din partea superioară. Straturile inferioare se delată și se începe ridicarea lichidului mai cald. Atunci transferul de căldură se va realiza în baza mișcării macroscopice a mediului. Toate aceste fenomene sunt caracteristice transferului de umiditate în materialele capilare poroase.

Transferul de umiditate în prezența perturbațiilor macroscopice se realizează mai intensiv comparativ cu transferul, provocat numai de mișcarea termică a moleculelor. De aceea, ca exemplu, transferul de căldură în mediul perturbat este mai evidențiat în comparație cu cel realizat numai din conținutul deplasării termice a moleculelor. Pentru reducerea influenței schimbului de căldură prin convecție este necesar de limitat posibilitatea apariției perturbațiilor macroscopice. Aceasta se realizează prin divizarea mediului gazos în zone microscopice. Ca exemplu de astfel de medii pot servi corpurile capilare poroase, cum sunt produsele agroalimentare.

Cota parte a fluxului termodinamic dictat de convecția naturală este foarte mică, dar în calculele precise este necesar de a le lua în considerație.

La aplicarea câmpurilor electromagnetice în product, conform [5, 9] se formează o sursă internă de căldură P_v . În acest caz ecuația transferului de căldură se scrie în forma următoare:

$$c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\text{div} J_q + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + P_v \quad (9)$$

Totodată, unii de autori [10, 11] menționează, că în teoria transferului de masă și de căldură a lui Lîkov este necesar de introdus unele precizări și completări.

În particular, în [10] se indică că pentru cazul uscării materialelor la temperaturi joase, când produsul posedă și umiditate în formă solidă, are loc topirea acesteia. În acest caz câmpul de umiditate în fiecare zonă practic este stabil, deci ecuația (4) poate fi prezentată fără sursa de căldură, inclusiv și încălzirea prin convecție, deoarece criteriul transformării de fază pentru zonele în faza de topire $\varepsilon_2=0$, iar pentru zonele cu gheață solidă $\varepsilon_1=1$.

Deci, după cum indică [11] din formulele (5) și (6) se obține forma ecuației Stefan. Această ecuație diferențială la frontieră v-a fi:

$$\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial x} \right)_{x=\lambda} - \lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial x} \right)_{x=\lambda} = r_G q_2(\tau)_{x=\lambda} = r_G \rho_G \left(\frac{\partial x}{\partial \tau} \right) \quad (10)$$

în care ρ_G este cantitatea de gheață transferată în apă.

$$\rho_G = \frac{\rho_0 (W - W_N)}{100} \quad (11)$$

în care W este cantitatea de umiditate totală în material, în %;

W_N - este cantitatea de umiditate neinghețată în material, în %;

De asemenea poate fi considerat loc slab și faptul, că în ecuațiile (5) și (6) au fost luate în considerație corpuri de forme ideale geometrice (placă infinită, cilindru infinit etc.), pe când în practică se întâlnesc figuri de configurații diferite, ca exemplu produsele alimentare. Pentru astfel de figuri este necesar de inclus dimensiuni geometrice echivalente, iar aceasta, la rândul său modifică ecuațiile diferențiale ale transferului de masă și de căldură.

Dar, cele menționate nici de cum nu diminuează valoarea științifică a lucrărilor academici-anului Likov și influența acestora asupra dezvoltării continue a teoriei transferului de masă și de căldură.

Durata, consumul de energie și calitatea oricărei proces tehnologic, inclusiv și de uscare este determinată de valoarea vitezelor fluxurilor implicate în proces (de căldură, de masă etc.). Deci, pentru intensificarea procesului, este necesar de mărit viteza acestor fluxuri. Totodată, conform teoriei Onsanger [2] (formula 1), mărirea vitezei fluxului este posibilă la mărirea coeficienților cinetici, a forțelor motrice sau la mărirea ambilor componenți. Coeficienții cinetici în majoritatea cazurilor sunt funcții de temperatură a mediului. Mărirea valorii acestora evident v-a provoca mărirea temperaturii, ceea ce este contra indicat pentru produsele agroalimentare, în special oleaginoase. În acest caz, intensificarea procesului de uscare este posibilă numai prin mărirea valorii forțelor motrice (∇T , ∇C , ∇P , etc.). După părerea noastră, dirijarea cu valorile gradientilor decisivi ai procesului de uscare în scopul intensificării acestuia și menținerii temperaturii produsului la valorile necesare poate fi realizată prin aplicarea impulsională a energiei.

Aplicarea impulsională a energiei presupune acționarea direcționată a forței perturbatoare pe o perioadă scurtă de timp însoțită de un repaos de relaxare. Astfel, alegerea corectă a duratei de aplicare a energiei și duratei de repaus poate permite obținerea unor valori maxime ale grad. T la temperaturi reduse ale produsului.

Temperatura straturilor interne ale materialului, creată în urma acționării câmpurilor electromagnetice, este funcție dependentă de caracteristicile dielectrice ale acesteia, intensitatea câmpului electromagnetic și durata de aplicare a lui. Totodată, temperatura maximă admisibilă este determinată de indicii calitativi ai produsului finit și de regulamentul tehnologic al procesului realizat. Deci, pentru a menține temperatura mai jos de cea limită, la încălzirea materialului în câmp

electromagnetic este necesar de a crea artificial perioade de relaxare. Acest efect de relaxare și poate fi realizat prin aplicarea impulsională a câmpului electromagnetic.

Bibliografie

1. **De Groot S., Mazur R.** *Neravnovesnaia termodinamica*. M.: Mir, 1964. – 456 p.
2. **Osanger L.** *Reciprocal relations in irreversible processes*. // *Phis. Rev.*, 1931. – 237(14) P.405-426; 238(12). – P.2265-2279.
3. **Prigojin I.** *Vvedenie v termodinamiku neobratimih protessov*. – M.: Inostr. Lit., 1960. -127 p.
4. **Etkin V.** *O edinstve dvijuscihsil neobratimih protessov*. // *Jurn.fiz.him.* -1989. –V.63. p. 1660-1662.
5. **Etkin V.** *Termodinamika. Tolieati Izd-vo Mejdunar. acad. biznesa i bank. dela*. 1999, -p. 184.
6. **Protesi i aparati harcevnih virobnittv: Pidrucinic / Za red.Prof. I.F.Malejika**. -K: HYXT, 2003. – 400 p.;
7. **Lupashko A., Nastas O., Moshanu A.** *O primenenii netraditionnih metodov sushki plodov kostockovih.* / *Materiali Naucho-Tehniceskoi Konferentii «Mashinostroenie i tehnosfera XXI veka» T.2.* –Donetk: 2002, p. 160-164.
8. **Rogov I. Nekrutman S.V.** *Sverhvisokoceastotnii nagrev pishcevih productov*. – M.: Agropromizdat. 1986, -351 p.
9. **Likov A.** *Teoria sushki*. – M.: Tnerghia, 1968. 470 p.
10. **Etkin V.** *O forme zakonov mnogokomponentnoi difuzii*. // *Jurn. fiz. him.* -1994. –V.68. p.2117-2121.
11. **Buleandra A. Ivashcenco N.** *Obobschenie nestacionarnogo vlagoperenosa v proccessah sushki pischevih productov*. // *Tr. I-oi mejd. naucino-practiceskoi konf. «Sovremennye energosberelayushchie tehnologii»* - M.: Mosk. gosud. agroinj. univ. im. V.Goreacikina. 2002. -T.2. p. 82-85.