НАУКОВІ ПОВІДОМЛЕННЯ

УДК 532.516:536.24

М.І. Нікітенко, Ю.Ф. Снєжкін, Н.М. Сорокова
Інститут технічної теплофізики НАН України

ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Нікітенко М.І., Снєжкін Ю.Ф., Сорокова Н.М., 2009

Викладається енерго- і ресурсозберігаючий спосіб зневоднення термолабільних матеріалів, що передбачає монотонну зміну температури сушильного агента. Наведено схему сушильної установки для реалізації такого способу.

The way dewatering of thermolabile materials, which allows to save resources and energy and provides monotonous change of temperature of the drying agent is stated. The circuit of drying installation for realization of the given way is resulted.

Сучасною тенденцією розвитку сушильних технологій є досягнення енерго- і ресурсозбереження та інтенсифікації процесу зневоднення у разі отримання високої якості готової продукції. Інтенсифікація сушіння термолабільних матеріалів за рахунок підвищення температури теплоносія обмежена, оскільки у разі їх зневоднення у кожен момент часу температура тіла повинна залишатися нижчою від певного граничнодопустимого значення T^*. У [1] запропоновано спосіб сушіння термолабільних матеріалів, який передбачає зміну температури сушильного агента і відбувається в два етапи. На першому етапі зневоднення матеріал обдувається сушильним агентом з постійною температурою T_c, яка зазвичай істотно вища від граничнодопустимої T^*. Коли температура на зовнішній границі тіла досягає значення T^*, перший етап завершується. На другому етапі сушіння на зовнішній границі тіла підтримується постійна температура, що дорівнює T^*, це досягається зміною температури сушильного агента. Цей спосіб забезпечує мінімальний час сушіння при даних значеннях T^* і початкової температури T_c сушильного агента, та скорочує енерговитрати у разі високої якості готового продукту.

Графік зміни температури T_c повинен визначатися залежно від виду матеріалу, його початкових значень температури і вологовмісту, геометричних і теплофізичних параметрів, від швидкості, температури і вологості сушильного агента. Експериментальне одержання таких графіків пов'язано з істотними труднощами. Раціональніший спосіб його отримання ґрунтується на застосуванні методів математичного моделювання динаміки тепломасопереносу в пористих системах.

Більшість термолабільних матеріалів є колоїдними капілярно-пористими тілами, об'єм яких під час сушіння зменшується в кілька разів. В [2], на базі законів збереження і основних положень механіки деформованого тіла, отримано диференційне рівняння переносу субстанції W (маси, енергії) $\frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla J_W + I_W - \frac{W}{1+\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$, яке при $\varepsilon = 0$ переходить у відоме рівняння Умова. Відносну об'ємну деформацію ε можна знайти на основі рівняння термоконцентраційного деформування [3], якщо відомі функції температури T і об'ємних концентрацій рідини $U_р$, пари $U_п$ і повітря $U_{пов}$. Для тіл найпростішої геометрії функцію ε можна отримати аналітично. Для пластини $0<x_1<H$, деформування якої зв'язано з симетричним відносно її середньої площини $x_1=H/2$ розподілом концентрації компонентів та температури вздовж осі x_1, аналітичний розв'язок [2] має вигляд:

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \frac{1}{H}\int_0^H N dx_1\,,\ \varepsilon_{11} = \frac{1+\nu_П}{1-\nu_П}N - \frac{2\nu_П}{1-\nu_П}\varepsilon_{22}\,,\ \varepsilon = (1+\varepsilon_{11})(1+\varepsilon_{22})(1+\varepsilon_{33})-1]\,.$$

Тут $N = \beta_T (T - T_0) + \sum_{\psi} \beta_\psi (\omega_\psi - \omega_{\psi 0})$ – термоконцентраційна функція [3], де $\beta_T = (\partial x / \partial T)/x$; $\beta_\psi = (\partial x / \partial \omega_\psi)/x$; ω_ψ – масовміст компонента ψ; ν_{Π} – коефіцієнт Пуассона.

Густина потоку маси (W=U_ψ) компонента ψ (ψ=р, п, пов) $J_{U\psi}$ включає дифузійну і фільтраційну складові: $J_{U\psi} = J^{д}_{U\psi} + J^{ф}_{U\psi}$. Дифузійний потік пропорційний градієнтам U_ψ і T: $J_{U\psi} = -D_\psi(\nabla U_\psi + \delta \nabla T)$. Ефективний коефіцієнт дифузії рідини $D_р$ в порах тіла знаходиться за формулою [4] $D_р = \gamma_{Dр}[\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$, де A_D – енергія активації, R – універсальна газова стала, а для пари і повітря $D_п$=$D_{пов}$= $\gamma_{Dп} T^{3/2}/P_г$. Фільтраційні потоки рідини, пари та повітря обчислюються за співвідношеннями $J^{ф}_р = U_р w_р$, $J^{ф}_п = U_п w_г$, $J^{ф}_{пов} = U_{пов} w_г$. Швидкості фільтраційного руху рідкої $w_р$ і газової фаз $w_г$ згідно з законом Дарсі [2] пропорційні градієнтам їх тисків. Тиски $P_р$ і $P_г$ виражаються через функції $U_р$, $U_п$, $U_{пов}$ і T. Об'ємні частки скелету $\Psi_т$, рідини $\Psi_р$ і газу $\Psi_г$ в пористому тілі знаходять за виразами $\Psi_т = (1–П)$, $\Psi_р = U_р/\rho_р$ і $\Psi_г = 1–\Psi_т–\Psi_р$, де П – пористість, $\rho_р$ – густина рідини. Парціальні густини пари і повітря $\rho_п$=$U_п$/$\Psi_г$ і $\rho_{пов}$=$U_{пов}$/$\Psi_г$, а парціальні тиски $P_п$=$\rho_п R_у T/\mu_п$ і $P_{пов}$=$\rho_{пов} R_у T/\mu_{пов}$. Тиск парогазової суміші буде $P_г$=$P_п$+$P_в$. Тиск рідкої фази $P_р$ = $P_г$+$P_к$, де капілярний тиск $P_к$ шукається [5] як середній капілярний тиск рідини. Об'єм рідини $dV(r)$ в порах з радіусами від r до r+dr в одиничному об'ємі тіла пропорційний диференційній функції $F(r)$ розподілу пор за розмірами і об'ємною часткою $\theta(r)$ капіляра, зайнятою рідиною: $dV(r)$=$\theta(r)F(r)dr$. Тоді середнє значення капілярного тиску в точці

$$P_к = 2\sigma(T) \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r)dr \Big/ \int_{r_{min}}^{r_{max}} \theta(r)F(r)dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \qquad r_{min} < r^* < r_{max}, \tag{1}$$

де r_{min} і r_{max} — мінімальний і максимальний радіуси пор одиничного об'єму.

Інтенсивність I фазового переходу рідини в пару на зовнішній поверхні тіла визначається за формулою, отриманою на базі закону Н.І. Нікітенко для інтенсивності спектрального випромінювання частинок тіла [4]

$$I = \gamma_с \left\{ \overline{\varphi} \left[\exp\left(A/(RT|_{\nu=0}) \right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_с \left[\exp\left(A/(RT_с) \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad \varphi_с = P_П / P_н(T_с). \tag{2}$$

Тут $\gamma_с$ – поверхневий коефіцієнт випаровування; $\overline{\varphi}$ – рівноважна вологість повітря, якій відповідає значення $U_р$ при температурі T, що знаходиться за ізотермою сорбції для такого матеріалу; $\varphi_с$ – відносна вологість зовнішнього середовища.

У другому періоді сушіння $U_р$ на поверхні тіла прагне до нуля. З рівняння збереження енергії для елементарного об'єму, що примикає до граничної поверхні, очевидно, що коли $U_р|_{\nu=0} \to 0$ (ν – нормаль), вся рідина, яка підходить до поверхні, випаровується і результуючий потік пари дорівнює

$$I = -D_р \left. \frac{\partial U_р}{\partial \nu} \right|_{\nu=0}. \tag{3}$$

За умови, що температури фаз у кожній точці тіла збігаються, вираз для інтенсивності випаровування рідини в одиничному об'ємі пористого тіла очевидний з (2)

$$I_V = \gamma_V \left[\exp\left(A/(RT) \right) - 1 \right]^{-1} (\overline{\varphi} - \varphi), \; \varphi = P_П / P_н(T_г), \tag{4}$$

де γ_V – коефіцієнт об'ємного випаровування. Тиск насичення $P_н$ визначався за отриманою в [4] формулою $P_н = N_P \sqrt{T} [\exp(A/RT) - 1]^{-1}$, N_P = const, яка добре узгоджується з табличними даними.

Система рівнянь тепломасопереносу під час сушіння термолабільних матеріалів має вигляд:

$$c_{еф}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_{еф} \nabla T\right) = \nabla(\lambda_{еф} \nabla T) - L\gamma_V \left[\exp\left(\frac{A}{RT} \right) - 1 \right]^{-1} (1 - \varphi), \tag{5}$$

$$\frac{\partial U_{\text{р}}}{\partial t}+\nabla\left(w_{\text{р}}U_{\text{р}}\right)=\nabla(D_{\text{р}}\nabla U_{\text{р}})-L\gamma_V\left[\exp\left(\frac{A}{RT}\right)-1\right]^{-1}(1-\varphi)-\frac{U_{\text{р}}}{1+\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t},\tag{6}$$

$$\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial t}+\nabla\left(w_{\text{п}}U_{\text{п}}\right)=\nabla(D_{\text{п}}\nabla U_{\text{п}})+L\gamma_V\left[\exp\left(\frac{A}{RT}\right)-1\right]^{-1}(1-\varphi)-\frac{U_{\text{п}}}{1+\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t},\tag{7}$$

$$\frac{\partial U_{\text{пов}}}{\partial t}+\nabla\left(w_{\text{пов}}U_{\text{пов}}\right)=\nabla(D_{\text{пов}}\nabla U_{\text{пов}})-\frac{U_{\text{пов}}}{1+\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}.\tag{8}$$

Тут ефективні значення швидкості зв'язаної речовини, теплоємності і теплопровідності тіла визначаються так: $w_{\text{еф}}=\left|w_{\text{р}}c_{\text{р}}U_{\text{р}}+w_{\text{г}}\left(c_{\text{п}}U_{\text{п}}+c_{\text{пов}}U_{\text{пов}}\right)\right|/c_{\text{еф}}$, $c_{\text{еф}}=c_{\text{т}}\rho_{\text{т}}(1-\Pi)+c_{\text{р}}U_{\text{р}}+c_{\text{п}}U_{\text{п}}+c$ $+c_{\text{пов}}U_{\text{пов}}$, $\lambda_{\text{еф}}=$ $\lambda_{\text{еф}}=\lambda_{\text{т}}U_{\text{т}}/\rho_{\text{т}}+\lambda_{\text{р}}U_{\text{р}}/\rho_{\text{р}}+\lambda_{\text{п}}U_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}+\lambda_{\text{пов}}U_{\text{пов}}/\rho_{\text{пов}}$; L – питома теплота випаровування.

Граничні умови тепломасообміну для системи рівнянь (5) – (8) формулюються так:

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial\nu}\Big|_{\nu=0}=\alpha(T_{\text{с}}-T|_{\nu=0})-LI,\qquad D_{\text{р}}\frac{\partial U_{\text{р}}}{\partial\nu}\Big|_{\nu=0}+J_{\text{р}}^{\phi}\Big|_{\nu=0}=I,\tag{9}$$

$$-D_{\text{п}}\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial\nu}\Big|_{\nu=0}+J_{\text{п}}^{\phi}\Big|_{\nu=0}=\gamma_{\text{пс}}\left(U_{\text{п}}|_{\nu=0}-\rho_{\text{пс}}\psi_{\text{п}}\right),\ U_{\text{пов}}|_{\nu=0}=\frac{P_{\text{с}}\psi_{\text{г}}\mu_{\text{пов}}}{R_{\text{у}}T|_{\nu=0}}-U_{\text{п}}|_{\nu=0}\frac{\mu_{\text{пов}}}{\mu_{\text{п}}}.\tag{10}$$

На другому етапі сушіння граничні умови (9) для рівнянь (5) та (6) записуються в такий спосіб:

$$T|_{\nu=0}=T^{*},\qquad U_{\text{р}}|_{\nu=0}=0.\tag{11}$$

Якщо перша з умов (11) задовольняється зміною $T_{\text{с}}$, то з рівняння балансу енергії на границі

$$T_{\text{с}}=T\Big|_{\nu=0}+\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial\nu}\Big|_{\nu=0}+LI\right]/\alpha.\tag{12}$$

Тут I визначається за виразом (3) з врахуванням другої з умов (11).

Рівняння (5)–(12) розв'язували числовим методом [3], що ґрунтується на явній тришаровій перерахунковій різницевій схемі і процедурі розщеплення алгоритму за фізичними факторами. На основі такої математичної моделі і чисельного методу її реалізації розроблено програмний комплекс, що дозволяє розраховувати зміну в часі температури сушильного агента $T_{\text{с}}$.

На рис.1 наведено розрахункові та експериментальні дані для середнього вологовмісту, температури на зовнішній поверхні і температури сушильного агента під час сушіння шару столового буряка. Відхилення температури $T_{\text{г}}$ на поверхні шару буряка на другому етапі сушіння від граничнодопустимої T^{*} не перевищує 2 ºС і, отже, якість продукту відповідає нормативним вимогам. Розбіжності в розрахункових і вимірюваних значеннях температури сушильного агента $T_{\text{с}}$ не перевищують 3 ºС. Це свідчить про те, що керування сушінням розглянутого шару буряка можна виконувати з використанням наведеної на рис.1 залежності $T_{\text{с}}(t)$.

Використання винятково електричної енергії або природних палив для підігрівання сушильного агента не є раціональним засобом в сучасних умовах зростаючого енергоспоживання і дефіциту енергетичних ресурсів.

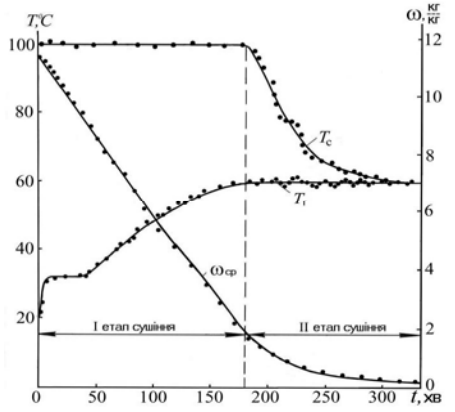

Рис. 1. Зміна в часі середнього вологовмісту $\omega_{\text{ср}}$, температури на зовнішній поверхні $T_{\text{г}}$ і температури сушильного агента $T_{\text{с}}$ при сушінні шару буряка товщиною H=12,5 мм: —— – розрахунок, • – експеримент, ($w_{\text{с}}$ = 1 м / с , $d_{\text{с}}$ = 9,6 г/кг с. пов., початкова температура $T_{\text{с0}}$ = 100 °C)

У [6] запропонована вдосконалена сушильна установка, в якій передбачається часткове підігрівання сушильного агента використанням теплоти відпрацьованого сушильного агента і висушеного продукту, та теплоти конденсації теплового насосного приладу.

Установка (рис.2) містить послідовно з'єднані по сушильному агенту охолоджувач-випарник 1 з вологовідокремлювачем, вентилятор 7, камеру охолодження і термовологостабілізації 8 готового продукту, рекуперативний теплообмінник 4, підключений також до виходу сушильного агента з сушильної камери 5, нагрівач-конденсатор 6 і калорифер 9. Установка оснащена тепловим насосним приладом, що включає компресор 3, конденсатор 6, дросельний вентиль 2 та випарник 1, в якому циркулює холодоагент. Камери 5 і 8 встановлені послідовно по ходу руху зневоднюваного продукту. В установці передбачені трипозиційні клапани для випуску 10 і подавання 11 зовнішнього повітря.

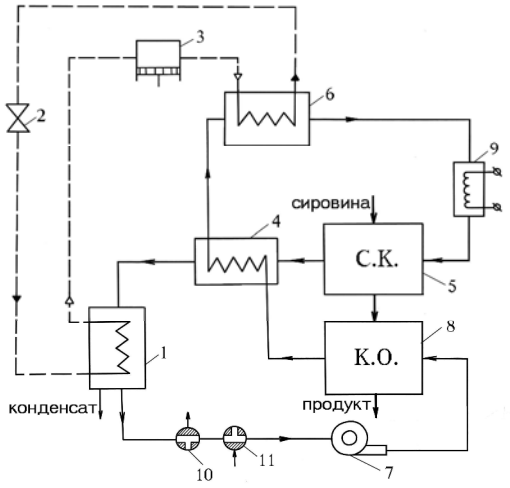

Рис. 2. Сушильна установка

Подавання в калорифер газу, попередньо підігрітого у камері охолодження, рекуперативному теплообміннику та нагрівачі-конденсаторі, значно зменшує витрати енергії в калорифері для досягнення агентом необхідної максимальної температури у першому періоді сушіння. Зміна температури теплоносія в другому періоді сушіння здійснюється регулюванням потужності калорифера, навіть до його відімкнення на завершальному етапі сушіння. Це дозволяє істотно скоротити енерговитрати на зневоднення термолабільних матеріалів за запропонованим авторами способом сушіння.

1. Деклараційний патент України № 62665 А Мкв, А23 В7/02 Спосіб сушіння термолабільних матеріалів / Нікітенко М.І., Снєжкін Ю.Ф., Сорокова Н.М. – Опубл. 15.12. 2003, Бюл. № 12. 2. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическая модель и метод расчета тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки в процессах сушки // Доп. НАН України. – 2002. – № 9, – С. 81–89. 3. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. –К.: Наук. думка. –1983. – 352 с. 4. Никитенко Н. И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц// ИФЖ. – 2002. – Т. 75. – № 3. – С. 128–134. 5. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическая модель и метод расчета тепломассопереноса и фазовых превращений в процессах сушки // Пром. теплотехника. – 2001.– Т. 23. –№ 3.– С.65–73. 6. Патент на корисну модель № 36183 України А 23 В 7/02 Сушильна установка / Нікітенко М.І., Снєжкін Ю.Ф., Сорокова Н.М. – Опубл. 10.10. 2008, Бюл. № 19.