

поверхні, а волога поглинається і відводиться навколишнім середовищем. Характерною особливістю контактної сушіння є велика швидкість процесу, яка в багато разів перевищує швидкість конвективного процесу.

За відношенню тіл до контактуючої поверхні контактні сушарки існують двох типів [3,5,6]:

- статичні контактні сушарки, в яких тіла прикріплюються до металевої поверхні;
- динамічні контактні сушарки, в яких тіла рухаються між нагрітими поверхнями.

Статичні контактні сушарки залежно від форми контактної поверхні бувають [7]: пластинчасті, тарілчасті, ємнісні, лопаткові. Прикріплення до контактної поверхні здійснюється здебільшого методом приклеювання. Динамічні контактні сушарки бувають [2,6]: стрічкові, вальцеві, жолобкові – з віброжолобом, обертові в двох площинах. За типом теплоносія контактні сушарки поділяються на парові та електричні.

Незважаючи на те, що на сьогодні створена досить велика кількість конструкцій контактних сушарок, технологічно контактне сушіння відпрацьоване ще недостатньо як в цілому, так і за відношенню до капілярно-пористих колоїдних тіл природного походження.

Контактно-вакуумне сушіння [3] є контактним сушінням в умовах середнього вакууму при тиску 1,33–13,3 кПа і є найбільш прогресивним методом сушіння, оскільки відрізняється високою інтенсивністю і достатньою економічністю. Тривалість контактно-вакуумного сушіння становить всього лише декілька хв.. На відміну від інших методів, контактне сушіння у вакуумі дає можливість інтенсивно вести процес при більш низьких температурних режимах. Це особливо важливо для сушіння термолабільних матеріалів. Недоліками контактно-вакуумного сушіння є значні габарити і складність обладнання для проведення цього виду сушіння.

Радіаційне сушіння – це сушіння інфрачервоними (тепловими) променями [1]. Теплові промені рухаються прямолінійно, і інтенсивність їх випромінювання незалежно від джерела їх походження зворотно пропорційна квадрату віддалі від нього. Джерелом теплових променів є електрична енергія (нитка накаливання) або безполум'яна газова горілка. Електронне сушіння або сушіння струмами високої частоти [1] поки що знаходиться на початковій стадії розвитку, і застосування його на практиці досить обмежено.

Сублімаційне сушіння полягає у вилученні вологи із замороженого матеріалу шляхом перетворення твердої фази (криги) в газоподібну. Цей метод досить широко застосовується в харчовій та фармацевтичній промисловостях. Для сушіння капілярно-пористих колоїдних тіл природного походження цей метод не застосовується, так само як і фільтраційне сушіння, яке останнім часом набуває все більшого розповсюдження.

Як показав проведений авторами аналіз, для сушіння капілярно-пористих колоїдних тіл природного походження застосовується переважно конвективний метод сушіння. Інші, більш прогресивні методи сушіння або застосовуються обмежено (контактне сушіння), або взагалі не застосовуються. На основі цього аналізу можна констатувати про доцільність проведення досліджень сушіння капілярно-пористих колоїдних тіл природного походження контактним і фільтраційним методами. Дослідження кінетики сушіння показали, що вказаний матеріал при не-

високих температурах і відносно низьких перепадах тисків сушиться за час значно менший, ніж описаними вище методами і забезпечує високі технологічні показники виробу.

Література

1. **The chemistry** and technology of leather. Volume III – process control of leather quality / Fred O'Flaherty, William T. Roddy, Robert M. Lollar// Reinhold publishing corporation, New York, 1962. – 503 S.
2. **Сажин Б.С., Сажин В.Б.** Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997. – 447 с.
3. **Отделка кож:** Учебн. пособие для студентов вузов. – Изд. 2-е перераб. и доп. / И. П. Страхов, А. А. Головтеев, Д. А. Куцади, Л. Б. Санкин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 360 с.
4. **Heavy leathers:** preparation and drying methods / Jones Colin// World Leather. – 1999. – 12, № 2. S. 75-76, 79-80.
5. **Trocknungstechnik**// Chem. – Ing. – Techn.. – 1997. – 69, № 12. – S. 1724-1733.
6. **Kontaktbandtrockner.** Eine wirtschaftliche Lösung bei häufigem Produktwechsel / Janosik Manfred, Liedy Werner// Chem. – Ing. – Techn.. – 1991. – 63, № 11. – S. 1135-1137
7. **Im Trend der Zeit** – /Thürmer Franz// Chem. – Ing.. – 1992. – 115, № 1. – S. 42-44.

УДК 674. 047

Доц. І.М. Озарків, к.т.н.; проф. П.В. Білей, д.т.н.;
доц. В.Д. Крамар, к.х.н. – УкрДЛТУ

ВИКОРИСТАННЯ МАТРИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПРОМЕНЕВОГО ТЕПЛООБМІНУ

Наведено рівняння теплообміну, які базуються на матричну систему.

Doc. I.M. Ozarkiv, prof. P.V. Bilej, doc. V.D. Kramar – USUFWT

Matrix methods application for solar radiation thermoexchange calculation

Equations based on a matrix system have been given.

Відомо, що в променевому теплообміні бере участь 4 або 5 окремих поверхонь (як сірих, так і абсолютно чорних), тому для визначення густин теплових потоків і температур поверхонь доцільно використати стандартні математичні методи, серед них і матричний метод. Проте, необхідно відзначити, що матричні методи можна використати для двох випадків: коли задається температура на поверхні матеріалу (крайова умова I роду) або задається густина питомого теплового потоку (крайова умова II роду).

Теплообмін випромінюванням описується крайовою умовою II роду. Розглянемо три сірі поверхні, які утворюють замкнуту систему. Нехай температури всіх поверхонь, що беруть участь в теплообміні, відомі і нам необхідно визначити результуючі густини потоків на всіх поверхнях. При цьому всі поверхні за відношенню до випромінювання є непрозорими і сірими, а розподіл енергії випромінюванням на поверхнях є рівномірним. Кожна поверхня є ізотермічною.

Необхідно відзначити, що використання матричного методу для розв'язку на ЕВМ має істотну перевагу, бо збільшення кількості поверхонь в задачі визначення густин результуючих потоків незначно збільшує обсяг роботи.

Результуючу густину потоку для кожної з трьох поверхонь можна визначити шляхом комбінації рівнянь:

$$q_e = \bar{\epsilon}_\lambda E_{\text{випр}} + RE_{\text{над}}; \quad (1)$$

$$(Q_i)_{\text{рез}} = F_i(q_{e,i} - E_{\text{над}}), \quad (2)$$

де: q_e – густина потоку ефективного випромінювання; R – коефіцієнт відбивання; $\bar{\epsilon}_\lambda$ – ступінь чорноти поверхні; (Q_i) – результуючий потік від i -ої поверхні; $E_{\text{над}}$ – падаючий потік ($E_{\text{над}} = q_{\text{над}}$).

В результаті можна отримати для поверхні F_l величину результуючого потоку

$$(Q_i)_{\text{рез}} = \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,1}}{R_{\lambda}} (E_{\text{випр},1} - q_{e,1}) = q_{e,1} - E_{\text{над},1}. \quad (3)$$

Падаюче на поверхню F_l випромінювання $E_{\text{над},l}$ зумовлене енергією ефективного випромінювання, що виходить від поверхні F_l і від всіх інших поверхонь, що утворюють дану замкнуту систему, тобто

$$F_l E_{\text{над}} = F_1 \Phi_{F_1 \rightarrow F_l} q_{e,1} + F_2 \Phi_{F_2 \rightarrow F_l} q_{e,2} + F_3 \Phi_{F_3 \rightarrow F_l} q_{e,3}. \quad (4)$$

Використавши співвідношення взаємності до останнього рівняння, отримаємо

$$E_{\text{над},1} = \Phi_{F_1 \rightarrow F_l} q_{e,1} + \Phi_{F_1 \rightarrow F_2} q_{e,2} + \Phi_{F_1 \rightarrow F_3} q_{e,3}. \quad (5)$$

Після підставлення виразу (5) в рівняння (3) будемо мати

$$(Q_i)_{\text{рез}} = \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,1}}{R_{\lambda,1}} (E_{e,1} - q_{e,1}) = q_{e,1} - (\Phi_{F_1 \rightarrow F_l} q_{e,1} + \Phi_{F_1 \rightarrow F_2} q_{e,2} + \Phi_{F_1 \rightarrow F_3} q_{e,3}) \quad (6)$$

або

$$\frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,1}}{R_{\lambda,1}} E_{\text{випр},1} = q_{e,1} \left(1 - \Phi_{F_1 \rightarrow F_l} + \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,1}}{R_{\lambda,1}} \right) + q_{e,2} (-\Phi_{F_1 \rightarrow F_2}) + q_{e,3} (-\Phi_{F_1 \rightarrow F_3}). \quad (7)$$

Аналогічним чином можна отримати рівняння для поверхонь F_2 і F_3 , тобто рівняння виду

$$q_{e,1} (-\Phi_{F_2 \rightarrow F_l}) + q_{e,2} \left(1 - \Phi_{F_2 \rightarrow F_2} + \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,2}}{R_{\lambda,2}} \right) + q_{e,3} (-\Phi_{F_2 \rightarrow F_3}) = \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,2}}{R_{\lambda,2}} E_{\text{випр},2}; \quad (8)$$

$$q_{e,1} (-\Phi_{F_3 \rightarrow F_l}) + q_{e,2} (-\Phi_{F_3 \rightarrow F_2}) + q_{e,3} \left(1 - \Phi_{F_3 \rightarrow F_3} + \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,3}}{R_{\lambda,3}} \right) = \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,3}}{R_{\lambda,3}} E_{\text{випр}}. \quad (9)$$

Вище наведені рівняння (7)–(9) можна представити в матричній формі

$$\bar{C} \times \bar{J}^T = \bar{B}^T \quad (10)$$

Для загального випадку, коли в променевому теплообміні приймає участь n поверхонь, що утворюють замкнуту систему, величина A буде представляти $n \times n$ – матрицю, що має такий вигляд

$$\bar{A} = [a_{ij}, i, j = \overline{1, n}]. \quad (11)$$

В свою чергу, j і B – стовпцеві матриці, що складаються із n – елементів, можуть бути виражені

$$\bar{J}^T = [j_i^T, i = \overline{1, n}]; \quad \bar{B}^T = [b_i^T, i = \overline{1, n}]. \quad (12)$$

Аналізуючи рівняння (7) – (9), можна побачити, що позадіагональні елементи матриці A мають такий вигляд

$$a_{ij} = -\Phi_{F_i \rightarrow F_j} (F_i \neq F_j), \quad (13)$$

а діагональні члени – такий вигляд

$$a_{ii} = 1 - \Phi_{F_i} + \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,i}}{R_{\lambda,i}} \quad (14)$$

Тоді елементи матриці B будуть виражати величину

$$b_i = \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,i}}{R_{\lambda,i}} E_{\text{випр},i}, \quad (15)$$

Таким чином, якщо температури всіх поверхонь відомі, то задача розрахунку результуючих густин теплових потоків на всіх поверхнях здійснюється в такій послідовності. Спочатку вираховують елементи матриць A і B . Зокрема, для всіх сірих поверхонь елементи матриці A визначають за рівняннями (13) і (14), бо елементи матриці A відомі, оскільки визначені геометричні умови і властивості поверхні. Елементи матриці-стовпця B для сірих поверхонь визначаються (15) і дані елементи залежать від властивостей поверхонь і відомих температур. Після визначення матриць A і B перетворюють матрицю A . Оберненою матрицею A буде матриця C , тобто

$$\bar{A}^{-1} = \bar{C} = [c_{ij}, i, j = \overline{1, n}], \quad (16)$$

в якій всі елементи є відовими величинами.

Тоді елементи матриці J можна визначити, розв'язуючи рівняння (10), тобто

$$\bar{J}^T = \bar{C} \times \bar{B}^T. \quad (17)$$

В свою чергу рівняння (17) можна представити у розгорнутому вигляді

$$j_i^T = c_{ij} \times b_j^T, i, j = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Тільки після того, як з рівняння (18) будуть визначені значення густини потоку ефективного випромінювання на всіх поверхнях, можна за допомогою рівняння (3) визначити значення густин результуючих потоків для всіх поверхонь, що беруть участь в променевому теплообміні. Густина результуючого потоку для сірої поверхні визначиться

$$(Q_i)_{\text{рез}} = \frac{\bar{\epsilon}_{\lambda,i}}{R_{\lambda,i}} (E_{\text{випр},i} - q_{e,i}), \quad (19)$$

Для крайової умови II роду (коли густина результуючого теплового потоку на всіх поверхнях задана, а треба знайти температури всіх поверхонь) необхідно рівняння (6) перетворити в матричну форму із відовими величинами. Для цього виключимо невідомі члени рівняння $E_{\text{випр}}$ і включимо замість них відові величини $(Q)_{\text{рез}}$. Тоді, для поверхні F_l замкнутої системи отримаємо рівняння

$$(1 - \Phi_{F_l \rightarrow F_l}) q_{e,l} + (-\Phi_{F_l \rightarrow F_2}) q_{e,2} + (-\Phi_{F_l \rightarrow F_3}) q_{e,3} = (Q_l)_{\text{рез}}. \quad (20)$$

Для такої задачі рівняння (20) констатує, що позадіагональні елементи матриці A в матричному рівнянні (10) будуть виражатися

$$a_{ij} = -\varphi_{F_i \rightarrow F_j} (F_i \neq F_j), \quad (21)$$

а елементи діагоналі будуть дорівнювати

$$a_{ii} = 1 - \varphi_{F_i \rightarrow F_j} \quad (22)$$

В свою чергу, елементи матриці B будуть мати такий вигляд

$$b_i = (Q_i)_{\text{рез}}'' \quad (23)$$

При такій формі запису елементи матриць A і B є відомими. Тому, як тільки будуть визначені елементи матриці A і B , внаслідок обернення матриці A отримаємо матрицю C . Інакше кажучи, елементи матриці густини потоку ефективного випромінювання визначаються рівнянням $\overline{J^T} = \overline{C} \times \overline{B^T}$, а температури поверхонь теплообміну можуть визначитися із рівняння (3), тобто

$$E_{\text{випр},i} = \sigma_o T_i^4 = \frac{\overline{R}_{\lambda,i}}{\varepsilon_{\lambda,i}} (Q_i)_{\text{рез}}'' + q_{e,i} \quad (24)$$

$$\text{або} \quad T_i = \frac{1}{\sigma_o} \cdot \left(\frac{\overline{R}_{\lambda,i}}{\varepsilon_{\lambda,i}} (Q_i)_{\text{рез}}'' + q_{e,i} \right). \quad (25)$$

Таким чином, матричний метод є зручним і одночасно потужним засобом для розв'язання задач променевого теплообміну для різних крайових умов.

УДК 674. 047

Доц. І.М. Озарків, к.т.н.; ст.викл. Ю.В. Книш, к.т.н.;
асист. М.М. Копанський; аспір. А.І. Мацьків – УкрДЛТУ

ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ СОНЯЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ ДЕРЕВИНИ

Наведено основні рівняння променевого теплообміну при сушінні деревини.

Doc. I.M. Ozarkiv, Yu.V. Knysh; M.M. Kopanskij; A.I. Matskiv – USUFWT

Main equations of thermoexchange at solar radiation of wood

Main equations of radiations of thermal exchange during timber drying.

Інтенсивність і механізм процесів тепло- і масообміну при нагріванні і сушінні матеріалів значною мірою залежить як від спектрофотометричних та енергетичних характеристик генератора інфрачервоних променів, так і від об'єкта обробки.

Основне рівняння тепло- і масообміну при терморадіаційно-конвективному сушінні має такий вигляд

$$q_{\text{випр}} + \alpha_k (t_c - t_{n.m}) = r q_m' + c \rho_o \frac{dt}{d\tau} R, \quad (1)$$

де: $q_{\text{випр}}$ – густина поглиненого потоку; α_k – коефіцієнт конвективного теплообміну; t_c , $t_{n.m}$ – відповідно температура агента сушіння і поверхні матеріалу; r – пи-

тома теплота пароутворення; q_m' – інтенсивність випромінювання; c – питома теплоємність деревини; ρ_o – базова густина; $dt/d\tau$ – швидкість нагрівання поверхні матеріалу, що сушиться; R – визначений розмір (для пластини – половина товщини).

Інтенсивність випромінювання визначається з кривих сушіння за формулою

$$q_m' = \rho_o R \frac{dU}{d\tau}, \quad (2)$$

де $dU/d\tau$ – швидкість сушіння в певний момент часу.

В свою чергу, зміна температури при наявності променевого теплообміну із одночасним проникненням променів в матеріал (об'єкт сушіння) описується диференціальним рівнянням

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{\varepsilon r}{c} \frac{dU}{d\tau} + \frac{W_A}{c\rho}, \quad (3)$$

де: a – коефіцієнт температуропровідності деревини; ε – коефіцієнт або критерій фазового переходу (коли в деревині вода переміщається в рідкому стані, то $\varepsilon=0$, а у вигляді пари – $\varepsilon=1$); W_A – об'ємна потужність поглиненого променевого потоку, $W_A = f(\tau, x)$.

Величина W_A залежить від глибини проникнення променів в деревину, тобто від спектрального коефіцієнта пропускання. Інакше кажучи, в міру поглиблення проникнення променів всередину об'єкта сушіння, об'ємна потужність потоку зменшується. У випадку, коли падаючий потік повністю поглинається самою поверхнею, то третій член правої частини рівняння (3) дорівнює нулю.

Для однорідного матеріалу при монохроматичному випромінюванні ослаблення потоку випромінювання описується законом Бугера [2]

$$D_\delta = D_0 \exp(-k_\lambda \delta), \quad (4)$$

або

$$\ln \frac{D_\delta}{D_0} = -Bu \ln e, \quad (5)$$

де: D_δ – коефіцієнт пропускання матеріалу товщиною δ ; D_0 – коефіцієнт пропускання поверхні (шару дуже малої товщини, тобто, коли $x \rightarrow 0$); k_λ – коефіцієнт ослаблення (екстинкції) потоку променів; e – основа натуральних логарифмів.

Автори роботи [3] констатують, що проникливість деревини сосни, осики і берези карельської для довжини хвилі $\lambda=1,1 \mu\text{м}$ і вологості $W=5...8\%$ описується рівнянням, відповідно

$$\begin{aligned} D_{\text{сос}} &= 41,59 \exp(-0,76125 \delta), \\ D_{\text{ос}} &= 69,37 \exp(-2,7836 \delta), \\ D_{\text{к.б.}} &= 53,8 \exp(2,2957 \delta), \end{aligned} \quad (6)$$

де δ – товщина матеріалу, мм.

Автори, правда, не фіксують чітко вологість і це виключає співставлення результатів досліджень і з дослідженнями інших вчених. З рівняння (5) видно, що об'єктивним критерієм виконання закону Бугера є наявність і обов'язковість прямолінійного зв'язку між $\ln D_\delta / D_0$ і товщиною матеріалу δ .