

Література

1. Феллер М.Н., Пинчевская Е.А. О прогнозе качества сушки в конвективных лесосушилках// Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2004, № 1. – С. 54-55.
 2. Феллер М.Н. Параболічні рівняння із випадковими коефіцієнтами пов'язані з нескінченновимірними виразами// Спектральні та еволюційні задачі: Труды Крымской осенней математической школы-симпозиума-1. – К., 1991. – С. 69-70.
 3. Пінчевська О.О., Гоняк В.М. Кінетика сушіння пиломатеріалів з вільхи// Наук. вісник НЛТУ України: Технологія та устаткування лісовиробничого комплексу. – Львів: НЛТУУ. – 2008, вип. 18.1. – С. 62-69.
-

УДК 674.048

*Проф. І.М. Озарків, д-р техн. наук; доц. Н.Д. Довга,
канд. фіз.-мат. наук; асист. З.П. Копинець; доц. Й.Л. Ацбергер;
студ. О.І. Озарків – НЛТУ України, м. Львів*

ШЛЯХИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ В СУШАРКАХ

Розкрито шляхи керування спектральним складом потоку випромінювання у сушарках. Наведено відповідні залежності критеріїв оптимізації.

*Prof. I.M. Ozarkiv; assoc. prof. N.D. Dovga; eng. Z.P. Kopynets; assoc. prof.
Y.L. Atcberger; stud. O.I. Ozarkiv – NUFWT of Ukraine, Lviv*

Ways of radiation energy optimization in dryers

The ways of spectral composition of radiation stream management in dryers have been considered. The proper dependences of optimization criteria are represented.

Відомо [1], що розрахунок, проектування і оптимізація енергії інфрачервоного (ІЧ) випромінювання мають ряд специфічних особливостей, що визначають порядок та структуру їх розрахунків. Сюди, насамперед, необхідно віднести такі:

- спектральний склад поглиненого об'єктом нагрівання та сушіння випромінювання, оскільки він прямо визначає інтенсивності нагрівання та сушіння, а також ефективність самої сушильної установки;
 - наявність попереднього етапу вибору спектрального складу ІЧ-випромінювання, який не пов'язаний із потужністю і температурою сушарки (на етапі проектного завдання);
 - температура випромінювачів (визначається спектральним випромінюванням).
- По-своєму, керування спектральним складом зводиться:
- до зменшення частки потоків небажаного спектрального складу шляхом організації поля випромінювання за рахунок рефлекторів (відбивачів і одночасно концентраторів випромінювання) із заданою конфігурацією або матеріалів із заданою анізотропією;
 - керування перевипромінюванням огорожень сушарки і генератора випромінювання шляхом зміни умов променевого теплообміну, тобто зміни часток енергії граничних поверхонь та випромінювачів у поглиненому потоці об'єкта сушіння;
 - зменшення часток цих потоків за рахунок керування оптичними властивостями (спектральними коефіцієнтами відбивання R_λ , пропускання D_λ і поглинання A_λ) екранів та випромінювачів.

Якщо, наприклад, розглядати схему теплообміну між двома селективними (вибірковими) поверхнями системи "генератора випромінювання – екранна поверхня", коли радіаційна температура визначається як температура еквівалентної поверхні, то густина результуючого потоку визначиться

$$q_{рез} = \sigma_0 \bar{\Theta}_{рад} \sum_{\Delta\lambda} \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon'_\lambda} + \frac{1}{A''_\lambda} - 1} \frac{\int_0^{\lambda_2} \Phi(\lambda, T_{з.в.}) F_{0\lambda}^{з.в.} d\lambda}{\int_0^{\lambda_2} \Phi(\lambda, T_{з.в.}) F_{0\lambda}^{з.в.} d\lambda} - \sigma_0 \Theta' \sum_{\Delta\lambda} \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon'_\lambda} + \frac{1}{A''_\lambda} - 1} \frac{\int_0^{\lambda_2} \varepsilon'_\lambda F_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^{\lambda_2} \varepsilon'_\lambda F_{0\lambda} d\lambda}, \quad (1)$$

де: $\Phi(\lambda, T)$ – спектральна функція генератора (джерела) випромінювання; σ_0 – постійна Стефана-Больцмана, $\sigma_0 = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $F_{0\lambda}$ – функція Планка; $\varepsilon_\lambda, A_\lambda$ – відповідно випромінювальна та поглинальна здатність поверхонь, що беруть участь у променевому теплообміні (згідно з [2], для деревини бука, наприклад, $\varepsilon_\lambda = 0,94$ і дуба $\varepsilon_\lambda = 0,89$); $\bar{\Theta}$ – наведена (інтегральна) температура, $\bar{\Theta} = (T/100)^4$; індекси ' та '' належать до екрану та об'єкта сушіння.

Для дослідження впливу основних параметрів (роду матеріалу, $\Phi(\lambda, T_{з.в.})$, $T_{з.в.}$, $T_{рад} = T_{кам}$, T) густину результуючого потоку $q_{рез}$ слід співставляти із результуючим загальним потоком q_Σ , тобто, коли в системі поверхня 2 (екрана, об'єкта оброблення) $T_{рад}$, тобто $T'' = T_{рад} = T_{кам}$, а випромінююча здатність її рівна ε'' ($\varepsilon'' = \varepsilon_m$) або одиниці. Тоді, відношення $f_{эф.,випр} = q_{рез} / q_\Sigma$ може розглядатися як критерій впливу спектрального складу, де

$$q_\Sigma = \sigma_0 \cdot \bar{\Theta}_{рад} \cdot \sum_{\Delta\lambda} \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon'_\lambda} + \frac{1}{\varepsilon''} - 1} \cdot \frac{\int_0^{\lambda_2} \varepsilon''_\lambda \cdot F_{0\lambda}^{рад} \cdot d\lambda}{\int_0^{\lambda_2} \varepsilon''_\lambda \cdot F_{0\lambda}^{рад} \cdot d\lambda} - \sigma_0 \cdot \Theta' \cdot \sum_{\Delta\lambda} \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon'_\lambda} + \frac{1}{A''_\lambda} - 1} \cdot \frac{\int_0^{\lambda_2} \varepsilon'_\lambda \cdot F_{0\lambda}' \cdot d\lambda}{\int_0^{\lambda_2} \varepsilon'_\lambda \cdot F_{0\lambda}' \cdot d\lambda}, \quad (2)$$

або для $\varepsilon' = 1$ і $\varepsilon'' = 1$, а $q = \sigma_0 \cdot (\bar{\Theta} - \Theta')$ залежно від постановки задачі.

Таким чином, розрахунки за прийнятою вище схемою дають можливість порівняти швидкість нагрівання (сушіння) матеріалу в камері з $T_{рад}$ (радіаційною температурою) із швидкістю нагрівання (сушіння) в камері сушіння з тією ж радіаційною температурою, але з допомогою джерел довільного спектрального складу; інакше кажучи, ці розрахунки дають змогу оцінити можливість використання селективності об'єкта сушіння (деревини) для інтенсифікації його нагрівання (сушіння) за рахунок спектрального складу випромінювання генератора і вибору селективності матеріалу огорожень камери.

Своєю чергою, врахування температури другого тіла T'' (об'єкта сушіння) буде еквівалентним розгляду системи трьох тіл, а його випромінювання буде "розбавляти" спектральний склад поглиненого потоку власним випромінюванням екрана (огороження) камери. Таким чином, дослідження системи трьох тіл, що беруть участь у променевому теплообміні, дасть змогу оцінити не тільки роль випромінювання екрана (огороження), але здійснити економічно обґрунтований вибір екранних (огороджувальних) матеріалів.

Таким чином, вплив критерію ефективності спектрального складу $f_{эф.,випр}$ показує, що:

- селективність багатьох матеріалів повинна бути використана для інтенсифікації процесів сушіння, як з допомогою варіації спектрального складу випромінювання генератора (джерела), так і правильного вибору матеріалу рефлектора-відбивача із заданою селективністю;
- критерій використання спектрального складу випромінювання може досягати значних величин, а у випадку "абсолютно чорної" поверхні може бути більшим за одиницю.

Енергія ІЧ-випромінювання, що проникла всередину матеріалу і поглинулась в його об'ємі, буде істотно впливати на характер температурного поля всередині матеріалу. Тому ця енергія повинна враховуватися в процесах розрахунку променевого теплообміну. Рівняння теплопровідності для одновимірної задачі, що враховує енергію, внесену променевим потоком і поглинену в середині тіла, буде мати вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot Q_v(x, T), \quad (3)$$

де: a – коефіцієнт теплопровідності; ρ – густина деревини за певної вологості; c – питома ізобарна теплоємність деревини; $Q_v(x, T)$ – енергія випромінювання, що поглинула одиниця об'єму матеріалу в площині x , Вт/м³.

Ця величина рівна з

$$Q_v(x, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_v(x, \lambda, T) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_n(\lambda) \frac{\partial A_\lambda(x, \lambda, T)}{\partial x} \cdot d\lambda, \quad (4)$$

де: $q_v(x, \lambda, T)$ – енергія монохроматичного випромінювання, що проникло в глибину матеріалу h_λ і поглинулось за одиницю часу одиницею об'єму із координатою x , Вт/(м³·мкм); $A_\lambda(x, \lambda, T)$ – спектральний коефіцієнт поглинання як функція товщини шару в площині x , температури матеріалу T і довжини хвилі λ ; $q_n(\lambda)$ – сумарний падаючий потік випромінювання.

Величина $q_v(x, \lambda, T)$ рівна першій похідній від $q_A(x, \lambda, T)$, тобто

$$q_v(x, \lambda, T) = \frac{\partial q_{A_\lambda}(x, \lambda, T)}{\partial x} = q_n(\lambda) \cdot \frac{\partial A_\lambda(x, \lambda, T)}{\partial x}. \quad (5)$$

Таким чином, рівняння теплопровідності для одновимірної задачі із врахуванням поглиненої енергії інтегрального випромінювання ($q_n(\lambda) \equiv q_\Sigma$) запишемо

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_n(\lambda) \frac{\partial A_\lambda(x, \lambda, T)}{\partial x} \cdot d\lambda. \quad (6)$$

Величину $A_\lambda(x, \lambda, T)$ у загальному випадку для одностороннього опромінення запишемо

$$A_\lambda(x, \lambda, T) = 1 - D_\lambda(x, \lambda, T) - \frac{q_x(\lambda, T)}{q_{x=0}}. \quad (7)$$

Відзначимо, що межі зміни λ залежать від конкретної формули спектра випромінювання. Наприклад, Фарбі (Англія) рекомендує приймати

$$\lambda_1 = 0,5 \cdot \lambda_{max}; \lambda_2 = 4,3 \cdot \lambda_{max}, \quad (8)$$

де λ_{max} – максимальна довжина хвилі випромінювання, що визначається із закону Віна, тобто $\lambda_{max} \cdot T = 2898$ мкм·К.

Хоча більшість учених [1] рекомендує для розрахунків межі зміни

$$0,40 \cdot \lambda_{max} \leq \lambda \leq 4,0 \cdot \lambda_{max}, \quad (9)$$

Розрахунки [3] показують, що спіраллю кварцевих ІЧ-генераторів у межах зміни $1200\text{K} \leq T \leq 320\text{K}$ випромінюється: 98,6 % при $T=2800\text{K}$ і 99,4 % при $T=2600\text{K}$ енергії. За кордоном на сьогодні дедалі більше використовують характеристику ІЧ-генератора за 90 % спектрального діапазону енергії випромінювання [1], що забезпечує достатню точність розрахунків і скорочує їх трудомісткість у 2...3 рази.

Другий метод організації поля випромінювання базується на геометрії сушильної установки, формі і розмірах джерел (генераторів) випромінювання, рефлекторів-відбивачів і об'єктів оброблення. Адже дані параметри регламентують ступінь використання концентрувальної частини установки, яка дорівнюватиме частці організованої частини потоку в результуючому потоці. При цьому ця частка буде більшою, коли потік від джерела, що падає на об'єкт сушіння після першого відбивання від рефлектора (огородження, екрана) буде більшим, тобто вона буде залежати від вибору і розрахунку форми (плоскої, параболо-подібної, еліпсоїдної тощо) рефлектора на етапі проектування сушарки.

Таким чином, показник ефективності відбивачів $f_{ef.,refl}$ буде виражати співвідношення часток із організованим і неорганізованим (дифузним) потоками випромінювання. Зазначимо, що неорганізований потік буде мати місце, коли форма оптичної частини сушарки вибрана без достатніх обґрунтувань (у цьому випадку частка променевого потоку від генератора (джерела), що падає на об'єкт після першого відбивання, визначається кутовим коефіцієнтом). У випадку, коли оптична частина сушарки спеціально розрахована таким чином, аби весь потік після першого відбивання від концентратора-рефлектора потрапив на об'єкт сушіння, буде і організований потік випромінювання.

Таким чином, коефіцієнт організації поля випромінювання $f_{ef.,org.n.}$ буде враховувати частку корисного потоку випромінювача, безпосередньо використовуюваного на об'єкті обробки без трансформації спектрального складу випромінювання або із заданою трансформацією спектрального складу.

Крім початкового вибору спектральної функції $\Phi(\lambda, T)$ випромінювача (джерела) одним із шляхів керування спектральним складом випромінювання є D_λ - і R_λ -фільтрування. При фільтруванні небажана частина спектра поглинається або зменшується при пропусканні D_λ або відбиванні R_λ і може, навіть, виключатися із променевого теплообміну у камері шляхом охолодження фільтра. Такий шлях може бути економнішим, незважаючи на великі втрати тепла, через виграв у інтенсифікації процесу сушіння.

Загальний коефіцієнт ефективності генератора випромінювання (без врахування перевипромінювань огорожень) можна представити

$$F_{ef., ген. випр.} = f_{ef., випр} \cdot f_{ef., орг.н.} \cdot f_{ef., фільтр}, \quad (10)$$

де $f_{ef.,\text{фільтр}}$ – коефіцієнт збільшення швидкості процесу сушіння за рахунок фільтрування випромінювання.

При цьому визначимо, що кожний конструктивний елемент сушарки (генератор 1, рефлектор 2, огороження камери 3 і об'єкт обробки 4) відповідно до частки потоку в результуючому (у нашому випадку – поглинаючому) потоці об'єму буде вносити свій внесок у кожний спектральний діапазон, зокрема і в діапазони, що впливають на швидкість процесу сушіння. Тоді, при допущенні лінійного зв'язку швидкості сушіння $dU/d\tau$ (U – вологовміст, τ – час) із $f_{ef.,\text{випр}}$ можна записати для частки випромінювання кожного конструктивного елемента в поглиненому потоці

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{q_{1,\text{погл}}}{q_{\Sigma,\text{погл}}} \cdot \frac{dU_1}{d\tau_1} + \frac{q_{2,\text{погл}}}{q_{\Sigma,\text{погл}}} \cdot \frac{dU_2}{d\tau_2} + \dots + \frac{q_{i,\text{погл}}}{q_{\Sigma,\text{погл}}} \cdot \frac{dU_i}{d\tau_i} = \frac{1}{q_{\Sigma,\text{погл}}} \cdot \sum q_{i,\text{погл}} \cdot \frac{dU_i}{d\tau_i}. \quad (11)$$

Для системи, що складається із 4-х вказаних вище конструктивних елементів сушарки, можна записати

$$f_{ef,\text{суш.}} = \frac{A_{44} \varphi_{44} q_4}{q_{\Sigma,\text{погл}}} f_0 - \frac{A_{42} \varphi_{24} q_2}{q_{\Sigma,\text{погл}}} f_{ef} + \frac{A_{43} \varphi_{34} q_3}{q_{\Sigma,\text{погл}}} f_{ef} + \frac{A_{41} \varphi_{14} q_1}{q_{\Sigma,\text{погл}}} \cdot f_{ef,\text{генвипр.}}. \quad (12)$$

Рівняння променевого теплообміну у матричній формі будуть мати вигляд

$$\sum_{\Delta\lambda} (\bar{F} - \bar{\varphi} \cdot \bar{R}) \cdot q_{nad} = \sum_{\Delta\lambda} \bar{\varphi} \cdot E_{\text{вл}}, \quad (13)$$

де:

$$E_{i,\text{вл}} = \int_{\lambda} \Phi_i(\lambda, T) \cdot F_0(\lambda, T) \cdot d\lambda; \quad (14)$$

$$q_{i,\text{рез}} = A_{\lambda,i} \cdot q_{i,\text{над}} - q_i; \quad (15)$$

$$\bar{F} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad \bar{\varphi} = \begin{vmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \varphi_{14} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} & \varphi_{24} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} & \varphi_{34} \\ \varphi_{41} & \varphi_{42} & \varphi_{43} & \varphi_{44} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Відзначимо, що рівняння розв'язується відносно $q_{\text{погл}}$ об'єкта обробки. При цьому задаються (наприклад в системі 4-х тіл) T_4 , $q_{\text{рез},s}$ ($q_{\text{рез},s} = \alpha(T_{\text{екр}} - T_c)$) або $q_{4,\text{погл}}$ та коефіцієнти A_{λ} і R_{λ} за всіма поверхнями. Індеси і-матриці відповідають номерам тіл, що беруть участь у теплообміні (див. вище). Результатом розрахунку є внесення кожного елемента сушарки із заданими властивостями в поглинений потік [див. рівня (11)].

Таким чином, розглянуту вище систему критеріїв оцінки ступеня оптимізації щодо базової сушарки запишемо

$$f_{ef.,\Sigma} = \frac{\frac{dU}{d\tau}}{\left(\frac{dU}{d\tau}\right)_{\text{баз}}} = f_{ef,\text{випр.1}} \cdot f_{ef,\text{випр.2}} \cdot f_{ef,\text{ст.}}, \quad (17)$$

яка дає змогу представити порівняльну ефективність $f_{ef.,\Sigma}$ сушарок, і скорочує кількість експериментів. Цю систему можна коректувати дослідним шляхом.

Література

1. Озарків І.М. Науково-технічні основи конвективно-радіаційного сушіння деревини: Дис. ... д-ра техн. наук. – Львів, 2006. – 404 с.
2. Озарків І.М., Ацбергер Й.Л., Копинець З.П. Критерії оцінки теплового потоку в умовах геліосушіння деревини// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – 2007, вип. 17.4. – С. 145-148.
3. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. – М.: Пищ. пром-сть, 1966. – 407 с.

УДК 697.94.(075)

Доц. В.Й. Лабай, канд. техн. наук –
НУ "Львівська політехніка"

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВТРАТ ЕКСЕРГІЇ У КОНДЕНСАТОРІ SPLIT-КОНДИЦІОНЕРІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Використано ексергетичний метод аналізу роботи одноступеневих хладонових холодильних машин місцевих автономних кондиціонерів. Встановлено залежність втрат ексергії у конденсаторі split-кондиціонера фірми "Sanyo" холодопродуктивності 2020 Вт від температури навколишнього середовища.

Ключові слова: ексергія, баланс, кондиціонер, ефективність.

Assoc. prof. V.Yo. Labay – NU "L'vivs'ka Politekhnik"

The dependence of losses of exergy in the condenser of "split" air conditioners from the out of doors temperature

In this article it was used the method of the exergetic analysis of one-step freon cooling engines of the local autonomous air conditioners. It was defined the dependence of losses of exergy in the condenser of "split" air conditioner of firm "Sanyo" with the cooling capacity 2020 W from the out of doors temperature.

Keywords: exergy, balance, air conditioner, efficiency.

Постановка проблеми

Холодильні машини, які застосовують в місцевих автономних кондиціонерах, потребують для зменшення енерговитрат вдосконалення, яке можливе з використанням сучасного методу термодинаміки – ексергетичного. [1, 2, 3]. Ексергетичний аналіз дає змогу встановити максимальні термодинамічні можливості системи, визначити втрати ексергії в ній та обґрунтувати рекомендації зі вдосконалення окремих її елементів. А для цього треба ретельно вивчити всі аспекти роботи холодильної машини місцевих автономних кондиціонерів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найбільш детально ексергетичний метод аналізу одноступеневих холодильних машин наведено в [1], який не пристосований для холодильних машин місцевих автономних кондиціонерів, де випарник і конденсатор омиваються відповідним повітрям, а в контурі холодильної машини циркулює інший холодоагент. Також коротко цей метод аналізу висвітлено у [2, 3].

Тому ми розробили ексергетичний метод аналізу роботи одноступеневих хладонових холодильних машин (без ефективного охолодження компрес-