

DOI: 10.69803/2312-3427-2024-2-85

УДК 674.8:681.5

Ю. О. Градиський, канд. техн. наук, доцент

email: gradiskiy@btu.kharkov.ua

<https://orcid.org/0000-0002-5226-6252>

В. І. Д'яконов, канд. техн. наук, доцент

email: v.i.diakonov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2951-4668>

М. О. Соседко, старший викладач

email: mashynia84@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1216-960X>

С. А. Шевченко, д-р техн. наук, доцент

e-mail: serg.shevchen@btu.kharkiv.ua

<https://orcid.org/0000-0002-7921-5252>

Державний біотехнологічний університет

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ АКТИВНИМ ВЕНТИЛЮВАННЯМ

Об'єктом дослідження є процес сушіння подрібненої деревини в бункерній галереї з активним вентиляванням. Метою статті є оптимізація процесу сушіння і зберігання подрібненої деревини в бункерній галереї з активним вентиляванням шляхом математичного моделювання стану подрібненої деревини за критеріями мінімуму енерговитрат і максимальної продуктивності установки з урахуванням технічних обмежень параметрів обладнання галереї. Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати такі задачі: визначити показники якості та варійовані параметри процесу сушіння подрібненої деревини; визначити обмеження на параметри процесу сушіння подрібненої деревини; визначити цільові функції оптимізації процесу сушіння подрібненої деревини; розробити структурну схему системи керування установкою та визначити її параметри з урахуванням обмежень. Дослідження здійснено методом математичного моделювання з використанням теорії термодинаміки необоротних процесів і принципу максимуму ентропії об'єкта. Відповідно до принципу максимуму ентропії об'єкта наведено рівняння, у якому варійованими змінними є ймовірності різних станів системи, та обмеження на «ресурси» (енергія, речовина, час тощо). Запропоновано використовувати модель елементарного шару подрібненої деревини, яка сушиться, для розробки моделі тепловологообміну в матеріалі. Для керування процесом сушіння на основі принципу максимуму ентропії розроблено структурну

схему системи керування. Система містить три контури керування, які дають змогу здійснювати регулювання вологості повітря на виході калорифера; регулювання продуктивності вентилятора залежно від параметрів атмосферного повітря; контроль процесу за параметрами повітря на вході та виході шару подрібненої деревини, що сушиться. Отримано цільові функції, що відповідають енергетичному критерію оптимальності процесу сушіння та максимальній продуктивності установки. Визначено граничні умови, якими можуть бути потужність електродвигуна вентилятора, потужність калорифера чи спожита електроенергія.

***Ключові слова:** подрібнена деревина, активне вентилявання, ентропія, термодинамічний підхід, принцип максимуму ентропії.*

Постановка проблеми. Подрібнену деревину на цей час у вітчизняній і світовій практиці сушать та зберігають у бункерних галереях з активним вентиляванням. Для подрібненої деревини як технічної замкненої системи властивий складний багатофакторний стан, тому для запобігання її самозайманню не потрібно контролювати процеси, що відбуваються в ній. Це дасть змогу здійснювати найраціональніше керування вентиляцією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] показано, що запобігти розвитку цвілі під час сушіння деревини (а, отже, і втратам маси деревної речовини внаслідок розкладання мікроорганізмами) можна за допомогою активного вентилявання. Однак здійснення вентиляції потребує обґрунтування її режиму з урахуванням економічних показників, зокрема витрат енергії. У роботі [3] показано, що зберігання та природне сушіння деревної тріски з енергетичних плантацій короткої ротації в штабелях просто неба може бути пов'язане з високими втратами сухої речовини внаслідок розкладання деревини мікроорганізмами, які сягають понад 20 %. Запобігти цьому можна за допомогою вентиляції холодним повітрям. Дістані в [3] результати свідчать про доцільність охолодження деревини після заготовлювання (щоб запобігти підвищенню температури, коли інтенсивність процесу біоруйнування деревини висока), та подальшого сушіння за сприятливих погодних умов), що підтверджується порівнянням енерговитрат на сушіння та ефекту від збільшення теплоти згоряння деревини. У роботі [4] змодельовано тісно пов'язані термодинамічні й мікробіологічні процеси під час сушіння зерна для прогнозування його перебігу. Здійснено математичний опис сушіння зерна при температурі навколишнього середовища. Активне вентилявання подрібненої деревини дає змогу зменшити втрати сухої речовини та енергії внаслідок її розкладання під час зберігання [5]. У роботі [5] показано, що для деревної тріски немає порогового значення вологості, яке забезпечує

абсолютну стійкість під час зберігання. Водночас доцільне значення вологості можна визначити на підставі прийнятної втрати сухої речовини. Наведені в [5] результати показують, що висувувати деревну тріску до рівня приблизно нижче за 20 % може бути неефективно, оскільки витрати енергії на сушіння не компенсують збільшення теплоти згоряння деревини.

Економічна ефективність процесу сушіння подрібненої деревини значною мірою визначається витратами енергії на продування деревини. Тож у роботі [6] наведено результати вимірювання перепаду тиску для різноманітних зразків деревної стружки, виготовленої з різної сировини з використанням багатьох подрібнювачів та під час зміни налаштувань подрібнювачів. В [6] показано, що перепад тиску зростає експоненціально зі збільшенням швидкості потоку повітря для всіх зразків. Методом множинного лінійного регресійного аналізу визначено залежність опору від насипної щільності, розміру та форми частинок, що визначають кількість, розмір і форму повітряних порожнин у подрібненому матеріалі.

Формулювання цілей статті. Метою статті є оптимізація процесу сушіння й зберігання подрібненої деревини в бункерних галереях з активним вентиляванням шляхом математичного моделювання стану подрібненої деревини за критеріями мінімуму енерговитрат і максимальної продуктивності установки з урахуванням технічних обмежень параметрів обладнання. Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати такі задачі: визначити показники якості та варійовані параметри процесу сушіння подрібненої деревини; визначити обмеження на параметри процесу сушіння подрібненої деревини; визначити цільові функції оптимізації процесу сушіння подрібненої деревини; розробити структурну схему системи керування установкою та визначити її параметри з урахуванням обмежень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зважаючи на сутність процесів, які відбуваються в деревині під час її зберігання, доцільно розглядати їх із застосуванням термодинаміки необоротних процесів [7]. Відповідно до термодинамічного критерію пристосування будь-яких структур до зміни зовнішніх умов, що оточують систему, система здатна адаптуватися (пристосуватися) до цих змін. Ізольована система у своїх реакціях прагне досягти стану, що характеризується максимальною ентропією, причому намагається це зробити в найкоротший строк [8, 9]. Принцип максимуму ентропії об'єкта може бути записаний у такий спосіб:

$$S(X) = \sum_i p(x_i) \log\left(\frac{1}{p(x_i)}\right) \rightarrow \max ,$$

де $S(X)$ – ентропія системи; $p(x_i)$ – імовірності різних станів системи.

Варійованими змінними в цьому разі є ймовірності різних станів системи. Як звичайно, максимум, що досягається, є умовним, оскільки завжди є обмежувальні умови, що перешкоджають нескінченному зростанню ентропії. Найістотнішими є обмеження на «ресурси» $U(x_i)$:

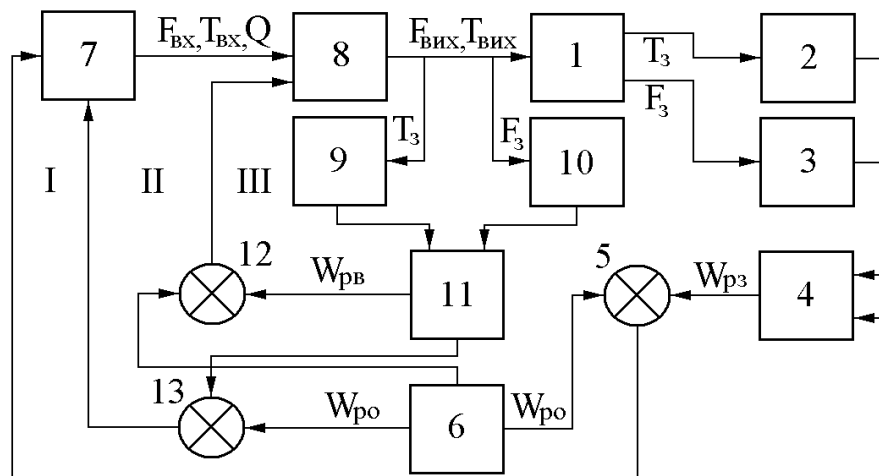
$$U(X) = \sum_i p(x_i)U(x_i) \leq const.$$

Як ресурси можуть виступати енергія, речовина, час тощо. З урахуванням обмежень принцип максимуму ентропії може бути записаний у такий спосіб:

$$S(X) = \lambda U(X) \rightarrow \max,$$

де λ – множник Лагранжа.

Множник Лагранжа відіграє роль масштабного коефіцієнта, що характеризує дефіцит ресурсів, і, отже, відносну вагу другого співмножника. Наприклад, якщо запас енергії в системі малий, то λ буде великим, отже, система у своїй поведінці керується «економією енергії». Якщо запас енергії великий, то у своєму розвитку система буде прагнути до збільшення ентропії. Далі розглянемо синтез системи керування процесом сушіння активним вентиляванням. Для керування процесом сушіння на підставі принципу максимуму інформації розроблено систему керування, структурна схема якої наведена на рис. 1.



1 – об’єкт керування; 2, 9 – датчики температури повітря; 3, 10 – датчики вологості повітря; 4, 11 – функціональний перетворювач (вимірювач рівноважної вологості); 5, 12, 13 – елемент порівняння; 6 – задавач рівноважної вологості; 7 – вентиляційний блок; 8 – калорифер

Рис. 1. Структурна схема системи керування процесом активного вентилявання

Система містить три контури й передбачає регулювання вологості повітря на виході калорифера; регулювання продуктивності вентилятора залежно від параметрів атмосферного повітря; контроль процесу за параметрами повітря на вході й виході шару, що сушиться. Під час розгляду проблем керування процесом сушіння встановлено, що для реалізації оптимального керування потрібно: мати регульований електропривід вентилятора з потужністю, що забезпечує належну продуктивність під час сушіння вологої подрібненої деревини; математичну модель тепловологообміну в шарі, що дає змогу розраховувати зміну параметрів сушильного агента та шару; критеріальне рівняння; граничні умови. Для розробки моделі тепловологообміну в шарі, що сушиться, запропоновано використовувати модель елементарного шару, фрагмент якої для каналу відносної вологості наведено на рис. 2.

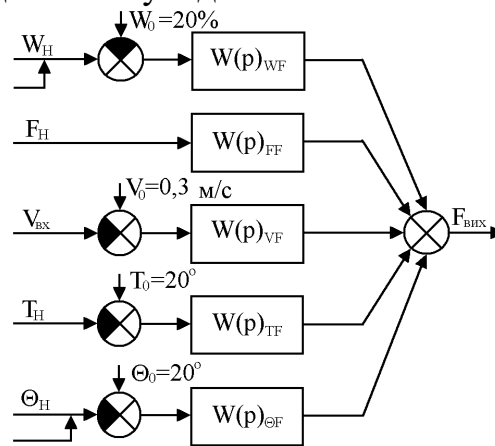


Рис. 2. Фрагмент моделі елементарного шару під час сушіння

Критеріальне рівняння розраховано із залежностей, що описують енергоспоживання калорифера під час сушіння активним вентиляванням. Загальне енергоспоживання на активне вентилявання складається з енергії, споживаної вентилятором, і енергії, що споживається калорифером, E_K . Якщо значення T , F і V постійні, то

$$\sum E = E_B + E_K = \frac{Q P}{3600 \times 1000 \eta} \tau_B + Q C_B \gamma_B (T_{ВЫХ} - T_{ВХ}) \tau_K, \quad (1)$$

де $\sum E$ – загальне енергоспоживання на активне вентилявання, Вт; E_B – енергія, що споживається вентилятором, Дж; E_K – енергія, що споживається калорифером, Дж; Q – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{год}$; P – напір вентилятора (опір шару, що сушиться), Па; η – ККД вентилятора; τ_B – час роботи вентилятора, год; C_B – питома теплоємність повітря, $\text{Вт} \cdot \text{год}/\text{кг} \cdot \text{°C}$; γ_B – щільність (питома вага) атмосферного повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; $T_{ВЫХ}$ – температура повітря на виході калорифера, °C ; τ_K – час роботи калорифера, год; $T_{ВХ} = T_{АТМ}$ – температура повітря на вході в калорифер (атмосферного повітря), °C .

З використанням критеріального рівняння для опису процесу сушіння активним вентиляванням отримаємо енергетичний критерій оптимальності:

$$E_H = 8,333 \times 10^{-10} Q^{0,31} \left(\frac{r\Delta W}{c_3\Delta\Theta} \right)^{0,95} \frac{(0,0064Q + 1,089 \times 10^{-6} Q^2) l^{2,07} d_{PP}^{0,24}}{\eta \left(\frac{T_C - T_m}{273 + T_C} \right) v^{0,31}} \rightarrow \min \quad (2)$$

Із урахуванням того, що потужність встановленого електродвигуна $N = 7,5$ кВт, граничні умови наберуть вигляду:

$$\begin{cases} \frac{2,778 \times 10^{-7} Q(0,0064Q + 1,089 \times 10^{-6} Q^2) l}{\eta} \leq 7,5; \\ 0,003Q^{-0,69} \left(\frac{r\Delta W}{c_3\Delta\Theta} \right)^{0,95} \left(\frac{T_H - T_M}{273 + T_H} \right)^{-1,9} \frac{d_{PP}^{0,24} l^{1,07}}{v^{0,31}} \leq \tau_{PP}; \\ Q > 0. \end{cases} \quad (3)$$

де $r = 2500$, кДж/кг; $v = 14,9 \times 10^{-6}$ м²/с; $d_{PP} = 3,48 \times 10^{-3}$ (для деревини), м; $c_3 = 1,0 + 0,046 W_H$, кДж/кг \times °С.

Якщо ставиться завдання забезпечити максимальну продуктивність установки з урахуванням технічних обмежень щодо потужності двигуна вентилятора, то цільова функція матиме вигляд:

$$\tau = 0,003Q^{-0,69} \left(\frac{r\Delta W}{c_3\Delta\Theta} \right)^{0,95} \left(\frac{T_C - T_m}{273 + T_C} \right)^{-1,9} \frac{d_{PP}^{0,24} l^{1,07}}{v^{0,31}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

за граничних умов

$$\begin{cases} \frac{2,778 \times 10^{-7} Q(0,0064Q + 1,089 \times 10^{-6} Q^2) l}{\eta} \leq 7,5; \\ Q > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Як граничну умову може бути використано й значення спожитої електроенергії, яке не має бути перевищене під час сушіння. Під час розрахунків оптимальної подачі вентилятора обов'язково потрібно враховувати енерговитрати на підігрів повітря. Граничні умови повинні

враховувати обмеження потужності калорифера на зниження вологості повітря. У цьому разі цільова функція енерговитрат має вигляд:

$$E_H = (8,333 \times 10^{-10} Q \left(\frac{r\Delta W}{c_3 \Delta \Theta} \right)^{0,95} \frac{(0,0064 Q + 1,089 \times 10^{-6} Q^2) l}{\eta} + 6 \times 10^{-4} Q c_v \gamma_B (F - 65) \left(\frac{r\Delta W}{c_3 \Delta \Theta} \right)^{0,95} \left(\frac{T_C - T_m}{273 + T_C} \right)^{-1,9} \frac{d_{ПП}^{0,24} l^{1,07}}{\nu^{0,31}} Q^{-0,69} \rightarrow \min . \quad (6)$$

За граничних умов

$$\begin{cases} \frac{2,778 \times 10^{-7} Q (0,0064 Q + 1,089 \times 10^{-6} Q^2) l}{\eta} \leq 7,5; \\ 6 \times 10^{-4} Q c_v \gamma_B (F - 6,5) \leq 18; \\ 0,003 Q^{-0,69} \left(\frac{r\Delta W}{c_3 \Delta \Theta} \right)^{0,95} \left(\frac{T_H - T_M}{273 + T_H} \right)^{-1,9} \frac{d_{ПП}^{0,24} l^{1,07}}{\nu^{0,31}} \leq \tau_{ПП}; \\ Q > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Друга нерівність у граничних умовах передбачає, що потужність калорифера не може бути більша, ніж у реальному бункері активного вентилявання – 18 кВт.

Висновки. Застосування термодинамічного підходу дало змогу розробити математичну модель процесу сушіння подрібненої деревини, у якій враховано параметри тепловологообміну в шарі деревини, що сушиться, та параметри технологічного устаткування. На цій основі розроблено структурно-математичну модель системи керування сушінням подрібненої деревини активним вентиляванням відповідно до визначених цільових функції оптимізації процесу сушіння та граничних умов.

Список використаних джерел

1. Fundamentals of wood drying. Edited by Patrick Perré. 2007. Nancy, France. A.R.BO.LOR. 385 p.
2. Nicolas Hofmann, Theresa Mendel, Fabian Schulmeyer, Daniel Kuptz, Herbert Borchert, Hans Hartmann. Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. *Biomass and Bioenergy*. 2017. 111. P. 196-205. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.03.022.
3. Carsten Lühr, Ralf Pecenka, Hannes Lenz, Thomas Hoffmann. Cold air ventilation for cooling and drying of poplar wood chips from short rotation coppice in outdoor storage piles in Germany. 2021. *Biomass and Bioenergy*. 146(3):105976. DOI:10.1016/j.biombioe.2021.105976.

4. Jörg Schemminger, Duncan O. Mbuge, Werner Hofacker. Ambient Air Cereal Grain Drying - Simulation of the Thermodynamic and Microbial Behavior. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019. 13(5):100382. DOI:10.1016/j.tsep.2019.100382.

5. Nicolas Hofmann, Herbert Borchert. Influence of fuel quality and storage conditions on oxygen consumption in two different wood chip assortments – Determination of the storage-stable moisture content. *Fuel*. 2022. 309. 122196. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122196.

6. Daniel Kuptz, Hans Hartmann. Prediction of air pressure resistance during the ventilation of wood chips as a function of multiple physical fuel parameters. *Biomass and Bioenergy*. 2021. 145. 105948. DOI:10.1016/j.biombioe.2020.105948.

7. Єрмолаєв О. М., Рашба Г. І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки: навч. посібник. Х.: ХНУ, 2004. 516 с.

8. Silviu Guiasu, Abe Shenitzer. The principle of maximum entropy. *The Mathematical Intelligencer*. 1985. 7. P. 42–48.

9. Приймаков О. Г. Математичне моделювання та методологія наукових досліджень. Х.: Вид-во ХУПС ім. І. Кожедуба, 2008. 356 с.

References

1. Patrick Perré. (Ed.). (2007). Fundamentals of wood drying. Nancy, France: A.R.BO.LOR.

2. Nicolas Hofmann, Theresa Mendel, Fabian Schulmeyer, Daniel Kuptz, Herbert Borchert, Hans Hartmann. (2017). Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. *Biomass and Bioenergy*. 111. 196-205. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.03.022.

3. Carsten Lühr, Ralf Pecenka, Hannes Lenz, Thomas Hoffmann. Cold air ventilation for cooling and drying of poplar wood chips from short rotation coppice in outdoor storage piles in Germany. (2021). *Biomass and Bioenergy*. 146(3):105976. DOI:10.1016/j.biombioe.2021.105976.

4. Jörg Schemminger, Duncan O. Mbuge, Werner Hofacker. Ambient Air Cereal Grain Drying - Simulation of the Thermodynamic and Microbial Behavior. (2019). *Thermal Science and Engineering Progress*. 13(5):100382. DOI:10.1016/j.tsep.2019.100382.

5. Nicolas Hofmann, Herbert Borchert. (2022). Influence of fuel quality and storage conditions on oxygen consumption in two different wood chip assortments – Determination of the storage-stable moisture content. *Fuel*. 309. 122196. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122196.

6. Daniel Kuptz, Hans Hartmann. (2021). Prediction of air pressure resistance during the ventilation of wood chips as a function of multiple physical

fuel parameters. *Biomass and Bioenergy*. 145. 105948. DOI:10.1016/j.biombioe.2020.105948.

7. Yermolaiev, O. M., & Rashba, H. I. (2004). *Vstup do statystychnoi fizyky i termodynamiky [Introduction to statistical physics and thermodynamics]*. Kh.: KhNU.

8. Silviu Guiasu and Abe Shenitzer. (1985). The principle of maximum entropy. *The Mathematical Intelligencer*. 7. 42–48.

9. Pryymakov O.H. (2008). *Matematychni modelyuvannya ta metodolohiya naukovykh doslidzhen [Mathematical modeling and methodology of scientific research]*. Kh.: Vyd. KHUPS im. I. Kozheduba.

Gradiskiy Y. O., Diakonov V. I., Sosiedko M. O. Shevchenko S. A. The thermodynamic approaches to optimize the drying of the grain mass active ventilation. Subject of study. Subject of study is the process of drying chopped wood in a bunker gallery with active ventilation. The aim of the study. The purpose of this article is to optimize the process of drying and storing chopped wood in a bunker gallery with active ventilation by means of mathematical modeling of the state of chopped wood according to the criterion of minimum energy consumption and the criterion of maximum productivity of the installation, taking into account the technical limitations of the parameters of the gallery equipment. Research method. The research was carried out by the method of mathematical modeling using the theory of thermodynamics of irreversible processes and the principle of maximum entropy of the object. Results of work. According to the principle of the maximum entropy of the object, an equation is written in which the varied variables are the probabilities of different states of the system, and limitations on "resources" (energy, matter, time, etc.). The parameters of active ventilation, which must be controlled, are substantiated. To control the drying process based on the principle of maximum entropy, a structural diagram of the control system was developed. The system includes three control loops that allow you to: adjust the air humidity at the outlet of the heater; regulation of fan performance depending on atmospheric air parameters; control of the process by air parameters at the entrance and exit of a layer of drying shredded wood. The target functions corresponding to the energy criterion of the optimality of the drying process and the maximum productivity of the installation were obtained. Boundary conditions are defined, which can be: fan electric motor power, heater power, or consumed electricity.

Key words: *chopped wood, active ventilation, entropy, thermodynamic approach, principle of maximum entropy.*

Стаття надійшла до редакції: 12.05.2024р.