

ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОПАРЮВАННЯ І СУШІННЯ ДРОВ

Р. О. Рокунь

НЛТУ України, м. Львів, Україна

Досліджено процеси початкового нагрівання і пропарювання деревини бука у вигляді профільних заготовок. Описано динаміку зміни температури деревини загалом та поверхневих і внутрішніх шарів деревини зокрема, а також зміну теплових властивостей (коефіцієнтів теплопровідності і температуропровідності та питомої теплоємності) деревини. Зміна теплових властивостей деревини призводить також до зміни теплообмінних критеріїв Фур'є та Нуссельта. Отже, використання диференційного рівняння теплопровідності Фур'є можливе тільки для визначеного періоду процесу нагрівання. Проведено експериментальні дослідження процесу сушіння профільних заготовок (дров) з попереднім пропарюванням та без попереднього пропарювання, знайдено відповідні величини швидкості сушіння, коефіцієнтів вологопровідності і вологовіддачі, коефіцієнта сушіння та масообмінних критеріїв Фур'є і Нуссельта, за якими, врахувавши критерій Рейнольдса, можна синтезувати фізико-математичну модель процесу сушіння. Розроблено структуру технологічного процесу сушіння дров, яка охоплює такі послідовні технологічні операції: початкове нагрівання – пропарювання – сушіння, що дає змогу значно інтенсифікувати тепломасообмінні процеси і, в підсумку, скоротити тривалість процесу сушіння на 25 % та відповідно заощадити витрати теплової енергії.

Ключові слова: вологість, густина, теплопровідність, питома теплоємність, температуропровідність, швидкість сушіння, вологопровідність, вологовіддача, деревина бука, нагрівання, пропарювання.

Вступ. Дослідження процесів початкового нагрівання і пропарювання деревини бука, які проводили дослідники, виявили динаміку зміни температури деревини та її фізичних (вологості, густини), теплових (теплопровідність, питома теплоємність, температуропровідність), механічних (показників міцності) та реологічних (деформації деревини: пружні, пружно-еластичні, залишкові) властивостей, а також зміни кольору (наприклад, у бука, вільхи та інших порід) (Bilej et al., 2012; Bilej, 1993; Pavljust, 1986; Kravec, 2000; Vintoniv, Sopushynskij, & Tajshinger, 2007; Bilej, 2005).

Найближчим аналогом технології сушіння дров може послужити технологічна схема сушіння профільних заготовок (взуттєвих колодок) з букової деревини. По суті, за зовнішньою конфігурацією колоті дрова також можна віднести до профільних заготовок з масивної деревини. Вони мають різний профіль торців (у вигляді сектора, сегмента кола, трапеції, трикутника ...), який може змінюватись по довжині заготовки.

Виробничий досвід сушіння дров виявив деякі складності проведення процесу, а саме: у початковий період процесу сушіння зменшуються радіуси макро- і мікрокапілярів та інших порожнин, особливо у торцевих зонах, що заблокує доступ вологи із внутрішніх до зовнішніх шарів деревини, і цим самим зменшується вологовіддача з поверхні матеріалу. Тому виникає великий перепад вологості по товщині і довжині матеріалу. Якщо би вологовіддача поверхні матеріалу відповідала внутрішньому вологоперенесенню, то тоді було б створено всі умови для інтенсивного видалення вологи, тобто сушіння. Окрім цього, букова деревина містить значну кількість екстрактивних речовин та й інших включень, що гальмують вологопровідність деревини. Отже, наявні всі аргументи, які підтверджують доцільність прийняття за основу технологічні схеми сушіння букових взуттєвих колодок та інші профільні заготовки: приклади та інші части-

ни стрілецької зброї, деталі музичних інструментів, меблевих і столярних виробів тощо (Pavljust, 1986; Kravec, 2000).

Основна частина. Перш ніж вивчати процеси нагрівання і сушіння деревини, потрібно визначити теплофізичні властивості деревини. У процесі початкового нагрівання змінюється температура деревини, а відповідно з цим і коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності, а також питома теплоємність деревини.

Якщо в процесі початкового нагрівання буде встановлено така вологість середовища ($\varphi=0,98\dots0,99$), що не буде відбуватись вологообмін (сушіння), то можна вважати, що середня вологість не буде змінюватись, тобто $\bar{W} = const$. Середню абсолютну вологість дослідних зразків визначають за формулою

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i, \quad (1)$$

де: n – кількість дослідних зразків, шт.; W_i – вологість окремого зразка, яку визначають за формулою

$$W_i = \frac{M_i - M_{oi}}{M_{oi}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де: M_i – маса окремого зразка у вологому стані, кг; M_{oi} – маса окремого зразка в абсолютно сухому стані, кг.

За величиною середньої абсолютної вологості деревини визначають середню відносну вологість деревини

$$\bar{W}_s = \bar{W} \frac{\bar{M}_o}{M_{oi}}, \quad \%. \quad (3)$$

За середньою відотною вологістю деревини та середньою температурою у процесі початкового нагрівання ($\bar{t} = \frac{1}{2}(t_0 - t_k)$, де t_0 – початкова температура деревини, °C; t_k – температура деревини в кінці процесу початкового нагрівання) за емпіричною формулою (Kravec, 2000) можна визначити середню питому теплоємність

$$\bar{C} = 1,172 \left[W_g \left(1 + \frac{\bar{t}}{100} \right) \right]^{0.2}, \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)}. \quad (4)$$

Коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності доцільно визначати для радіального напрямку та повздовж волокон. За експериментальними даними знайдено, що: $\bar{C}=2,54$ кДж/(кг °С); $\lambda_p=0,385$ Вт/(м °С); $\lambda_{II}=0,73$ Вт/(м °С); $a_p=1,76 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $a_{II}=3,37 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\rho_w=834$ кг/м³.

Щоб забезпечити рівномірне поступове початкове нагрівання деревини, потрібно, щоб питома потужність початкового нагрівання була постійною, тобто $N_Q=const$. Тоді можна за видозміненою формулою Ньютона визначити коефіцієнт теплообміну

$$\alpha = \frac{N_Q}{R_v \cdot (t_c - t_{нов})}, \text{ Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}, \quad (5)$$

де: N_Q – питома теплота початкового нагрівання, кВт/м³; R_v – співвідношення поверхні теплообміну до об'єму матеріалу (для експериментального матеріалу $R_v=48,5$ м²/м³); $t_c, t_{нов}$ – відповідно температура середовища та температура поверхні матеріалу, °С.

Згідно з розрахунками отримано, що коефіцієнт теплообміну зменшується від $a_{max}=37,1$ Вт/(м² °С) до $a_{min}=0,82$ Вт/(м² °С).

За отриманими вище даними можна визначити теплообмінні критерії Фурє (Fo_q) та (Nu_q) за відповідними формулами:

$$Fo_q = \frac{\alpha \tau}{R^2}, \quad (6)$$

$$Nu_q = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (7)$$

де: τ – тривалість певного періоду нагрівання, с; R – половина товщини матеріалу (для полін – це радіус вписаного кола торця сортименту), м.

Очевидним також є те, що теплообмінні критерії змінюються у процесі нагрівання. Реальним є визначення цих критеріїв для певного періоду процесу нагрівання.

За умови постійної потужності процесу початкового нагрівання деревини ($N_Q=const$) характер зміни температури деревини загалом можна описати лінійною залежністю за формулою

$$t_i = t_0 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_i, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

де: n – кількість ступеней процесу нагрівання; $\Delta t/\Delta \tau$ – градієнт зміни температури деревини, °С/год.

Структура технологічного процесу сушіння дров, як зазначено вище, складається з таких технологічних операцій: початкове нагрівання – пропарювання – сушіння. Результати сушіння дров без попереднього пропарювання: початкова середня вологість зразків зменшилась від початкового значення $\bar{W}_i=69,7$ % до кінцевого $\bar{W}_k=18,5$ %. Вологість центральних шарів зменшилась від $W_{ii}=71,0$ % до $W_{ii}=22,9$ %, а поверхневих шарів зменшилась від $W_{нов}=67,0$ % до $W_{нов}=9,5$ %. Загальна тривалість сушіння $\tau_c=120$ год, а середня швидкість становить $\Delta W/\Delta \tau=1,18 \cdot 10^{-4}$ %/с. Криву сушіння непропарених зразків зображено на рис. 1.

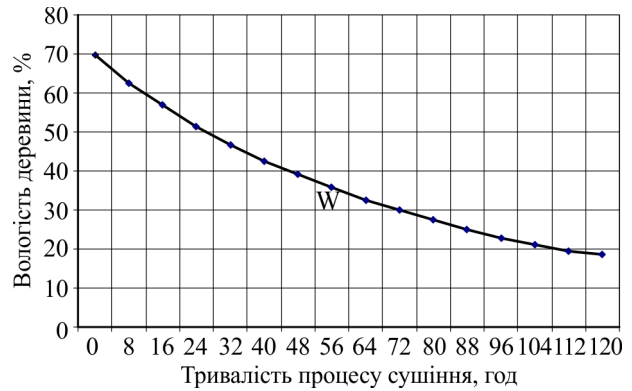


Рис. 1. Крива сушіння непропареного зразка деревини

Результати експериментального дослідження попередньо пропарених зразків такі: середня вологість деревини за час сушіння ($\tau_c=72$ год) змінилась від $\bar{W}_0=68,6$ % до $\bar{W}_k=15,2$ %. Вологість центральних шарів зменшилась від $W_{ii}=70,1$ % до $\bar{W}_{ii}=17,9$ %, а поверхневих – від $W_{нов}=65,6$ % до $\bar{W}_{нов}=9,7$ %. Середня швидкість сушіння становила $\Delta W/\Delta \tau=2,05 \cdot 10^{-4}$ %/с. Криву сушіння зображено на рис. 2.

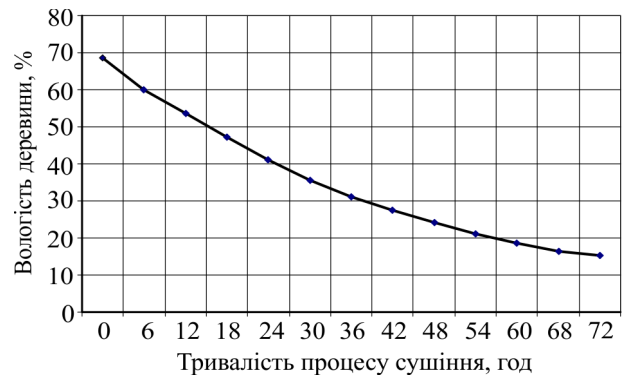


Рис. 2. Крива сушіння пропареного зразка деревини

У табл. наведено порівняльну характеристику процесу сушіння непропареної та пропареної деревини бука.

Табл. Порівняння кінетичних характеристик процесу сушіння непропареної та пропареної деревини

Вид оброблення	Кінетичні характеристики				
	сушіння $K, 1/\text{с}$	вологопровідність $a_m, \text{см}^2/\text{с}$	вологівдача $\beta, \text{см}/\text{с}$	Nu	Fo
Непропарений зразок	$5,05 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$3,46 \cdot 10^{-5}$	7,24	0,47
Пропарений зразок	$10,86 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$	0,79	0,69
Характер зміни	Зростає у 2,15 раза	Зростає у 2 раза	Зростає у 2,12 раза	Зменшується	Зростає у 1,5 раза

Згідно з даними табл., величина кінетичних коефіцієнтів зростає більш ніж удвічі для попередньо пропареної деревини порівняно з непропареною, що означає зменшення загальної тривалості процесу сушіння. На рис. 3 показано суміщені графіки швидкості сушіння пропарених та непропарених зразків деревини.

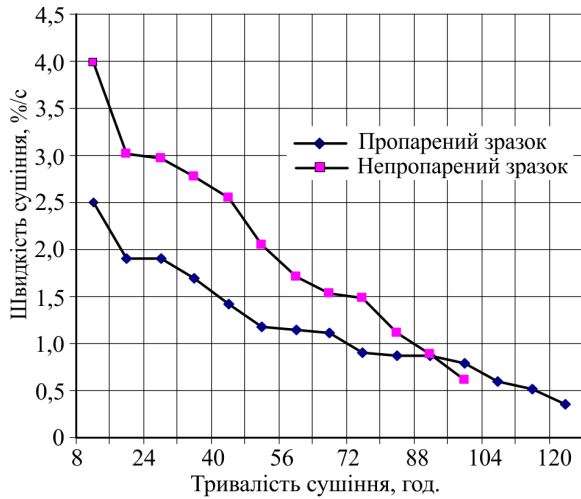


Рис. 3. Криві швидкості сушіння

Під час пропарювання зменшується середня вологість деревини на 10,7 % завдяки виділенню з деревини екстрактивних речовин. Своєрідним є розподіл вологості по довжині сортименту (поліна) після пропарювання: середня вологість у торцевих зонах становила $W_m=37,8\%$, а в середині зразка $W_m=69,3\%$. Градієнт вологості по довжині зразка становив $\Delta W/\Delta l=1,9\%/см$, що вказує на процес видалення основної маси вологи через торці. Масопровідність деревини під час екстрагування становила $8 \cdot 10^{-3} см^2/с$. Після сушіння розподіл вологості по довжині зразка зберігає таку ж тенденцію: вологість торцевої зони $\bar{W}_T=8,9\%$, а в середині зразка $\bar{W}_c=18,0\%$.

Висновки. На основі складених методик проведено експериментальні дослідження початкового нагрівання, пропарювання і сушіння дрів. За результатами експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

- Інтенсивність початкового нагрівання деревини залежить від етапу процесу нагрівання. На початку процесу (до досягнення значення $t_0=0,6 t_c$) швидкість початкового нагрівання становила $\Delta t/\Delta \tau=8\text{ }^\circ C/год$, а в діпазоні температур $0,6 t_c \dots 0,99 t_c$ інтенсивність нагрівання становила $\Delta t/\Delta \tau=2,8\text{ }^\circ C/год$. Загалом, середня інтенсивність процесу початкового нагрівання деревини становила $\Delta t/\Delta \tau=6\text{ }^\circ C/год$. Продовженням процесу початкового нагрівання є короткочасне (тривалість до 3 год) пропарювання деревини бука. Процес початкового

нагрівання матеріалу відбувається в насиченому парю середовищі ($\varphi=98$) і по суті для поверхневих шарів деревини процес пропарювання починається із середини тривалості початкового нагрівання деревини.

- Після процесів початкового нагрівання і пропарювання з деревиною бука відбуваються деякі зміни: зменшується вологість на 10,7 % завдяки виділенню із деревини екстрактивних речовин. На початку процесу сушіння перепад вологості по товщині становив $\Delta W=4\%$, а в кінці процесу $\Delta W=13,4\%$.
- Порівняння кінетичних характеристик процесу сушіння показало більш ніж удвічі зростання коефіцієнтів сушіння, вологопровідності і вологовіддачі, загальна тривалість циклу початкового нагрівання, пропарювання і сушіння деревини становить 90 год. Тобто загалом тривалість процесів нагрівання, пропарювання і сушіння є на 25 % меншою, ніж тривалість сушіння непропареної деревини.

Перелік використаних джерел

- Bilej, P. V. (1993). *Tehnologija kamernoj sushki tverdyh listvennyh porod. Doctoral dissertation for technical sciences* (05.17.08 – Processes and apparatuses of chemical technology). Lvov, p. 314. [in Russian].
- Bilej, P. V. (2005). *Teoretychni osnovy teplovoi obroblynnja i sushinnja derevyny: monografija*. Kolomyja: Vik, p. 364. [in Ukrainian].
- Bilej, P. V., Kunynec, Ye. P., Sokolovskij, I. A. et al. (2012). *Teoriya teplovoi obroblynnja derevyny*. – Lviv: ZUKC, p. 200. [in Ukrainian].
- Bilej, P. V., Sokolovskij, I. A., & Rokun, R. O. (2016). *Sposib sushinnja derevyny. Patent Ukrainy № 107440 na korysnu model*. Bjul. № 11 vid 10.06.2016. [in Ukrainian].
- Bilej, P. V., Sokolovskij, I. A., Bilej, P. P., Plesha, Yu. Yu., & Rokun, R. O. (2016). *Ustanovka dlja proparyvannja i sushinnja derevyny. Patent Ukrainy № 107506 na korysnu model*. Bjul. № 11 vid 10.06.2016. [in Ukrainian].
- Kravec, I. P. (2000). *Identyfikacija zakonovirnostej procesu proparyvannja bukovyh pylomaterialiv. Candidate dissertation for technical sciences* (05.05.07 – Machines and processes of forest complex). Lviv, p. 152. [in Ukrainian].
- Pavljust, V. N. (1986). *Usovershenstvovanie tehnologii sushki bukovyh profilnyh zagotovok. Candidate dissertation for technical sciences* (05.17.08 – Processes and apparatuses of chemical technology). Krasnojarsk, p. 184. [in Russian].
- Vintoniv, I. S., Sopushynskij, I. M., & Tajshinger, A. (2007). *Derevynoznavstvo*. Lviv: Apriori, p. 312. [in Ukrainian].

Р. А. Рокунь

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПАРИВАНИЯ И СУШКИ ДРОВ

Исследованы процессы начального нагрева и пропаривания древесины бука в виде профильных заготовок. Описана динамика изменения температуры древесины в целом и поверхностных и внутренних слоев древесины в частности, а также изменение тепловых свойств (коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости) древесины. Изменение тепловых свойств древесины приводит также к изменению теплообменных критериев Фурье и Нуссельта. Таким образом, использование дифференциального уравнения теплопроводности Фурье возможно только для определенного периода процесса нагревания. Проведены экспериментальные исследования процесса сушки профильных заготовок (дров) с предварительным пропариванием и без предварительного пропаривания, найдены соответствующие величины скорости сушки, коэффициентов влагопроводности и влагоотдачи, коэффициента сушки и массообменных критериев Фурье и Нуссельта, по которым, учитывая критерий Рейнольдса, можно синтезировать физико-математическая модель процесса сушки. Разработана структура технологического процесса сушки дрв, которая включает такие последовательные технологические операции: начальное нагревание – пропаривание – сушка, что позволяет значительно интенсифицировать тепло-массообменные процессы и, в конечном итоге, сократить продолжительность процесса сушки на 25 % и соответственно сэкономить расходы тепловой энергии.

Ключевые слова: влажность, плотность, теплопроводность, удельная теплоемкость, температуропроводность, скорость сушки, вологопроводность, влагоотдача, древесина бука, нагревание, пропаривание.

THE BASIC TECHNOLOGY OF STEAMING AND DRYING OF WOOD

Drying is a complex heat and mass transfer process which is affected by operating parameters environment and thermophysical properties of wood. Basis for classification of methods of drying is a method of transmission of heat to material. The basic method of drying is convective, but it is accompanied by a conductivity of wood (from the material surface to its center) and thermal radiation. The research investigates the processes of initial heating and steaming of beech wood in the form of profile pieces, which describes the dynamics of change in temperature of wood in general and particularly of surface and inner layers of wood, as well as changing the thermal properties (coefficients of heat-conducting, diffusivity and specific heat capacity) of wood. The change of thermal properties of wood causes the change of heat-exchange criteria of Fourier and Nusselt. So the use of differential equalization of heat-conducting of Fourier is possible only for the certain period of process of heating. Firstly, experimental studies of process of drying of profile workpiece (firewoods) are undertaken with a previous steaming and without a previous steaming; the corresponding sizes of speed of drying, coefficients of moisture conductivity and output of moisture are found. Consequently, taking into account the criterion of Reynolds the coefficient of drying and mass transfer coefficient of Fourier and Nusselt it is possible to synthesize the physical-mathematical model of process of drying. In the course of the study we have elaborated the structure of technological process of drying of firewoods. It is proved to include such successive technological operations as the initial heating, steaming, drying, that allows considerably to intensify mass transfer processes and, to the eventual result, shorten duration of process of drying on 25 % and accordingly to economize the charges of thermal energy. As a conclusion the author proposes structure of the technological process of drying wood that involves the use of environmentally-friendly drying agent for heating and steaming, and drying process steam-air mixture received from the combustion of waste wood. In general, the structure provides an energy saving of realization of technological process and reduces its overall duration.

Keywords: humidity; closeness; thermal conductivity; specific heat; diffusivity; speed of drying; of moisture conductivity; output of moisture; beech wood; heating; steaming.

Інформація про автора:

Р. О. Рокунь, аспірант, НЛТУ України, м. Львів, Україна.

E-mail: R525@ukr.net