

3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ



Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU

<http://nv.nltu.edu.ua>

<https://doi.org/10.15421/40271015>

Article received 08.12.2017 р.

Article accepted 28.12.2017 р.

УДК 674.047

ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)

@ ✉ Correspondence author

V. Yo. Labai

wlabay@i.ua

В. Й. Лабай¹, Л. Я. Сорока²

¹ Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

² Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

КІНЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКТИВНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ КОЛОЇДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Визначено, що складність тепломасообмінних процесів деревообробки полягає саме у складності явищ перенесення теплоти і вологи, як всередині матеріалу, так і на межі розподілу фаз середовища – тверде тіло та складності зміни фізико-механічних характеристик деревини під час теплового оброблення. За дослідний матеріал прийнято соснові пиломатеріали завтовшки 40 мм, які висушують м'якими режимами. В основу дослідження покладено побудову кривої сушіння, де вказано на зміну середньої вологості та вологості поверхневих і центральних шарів деревини під час сушіння. За цими даними визначено величини: швидкість сушіння, коефіцієнти сушіння, вологопровідності та вологовіддачі, а також величини масообмінних критеріїв Нуссельта, Фур'є та Кірпічова. За величинами коефіцієнта сушіння можна визначити тривалість сушіння пиломатеріалів з деревини сосни завтовшки 40 мм будь-якої початкової і кінцевої вологості та за величиною коефіцієнта вологопровідності будь-яких соснових пиломатеріалів різної товщини та початкової і кінцевої вологості й інших характеристик процесу сушіння. Визначення масообмінного критерію Кірпічова (критерію тріщиноутворення) показує наскільки обраний режим є безпечним з точки зору виникнення надлишкових внутрішніх напружень у деревині. За отриманими даними показників кінетики процесу сушіння і масообмінних критеріїв Нуссельта та Фур'є з доповненням до цих аеродинамічних характеристик сушильного обладнання, із врахуванням критерію Рейнольдса, можна скласти фізико-математичну модель процесу сушіння пиломатеріалів і заготовок. Ця фізико-математична модель визначає вплив на кінетику процесу сушіння параметрів сушильного середовища, теплофізичних властивостей деревини та аеродинамічних характеристик сушильних камер.

Ключові слова: деревина; вологість; вологопровідність; вологовіддача; коефіцієнт сушіння; тривалість процесу.

Вступ. Проблема конвективного сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів, до яких належить і деревина, полягає у комплексному вирішенні питань перенесення теплоти і вологи (маси) як всередині матеріалу, так і на поверхні матеріалу (на межі розподілу фаз середовища – тверде тіло). Тепломасообмінні процеси конвективного сушіння деревини мають складну структуру, тому що процеси нагрівання та видалення вологи з матеріалу супроводжуються як зміною параметрів середовища, так і фізико-механічних властивостей деревини. Процес конвективного процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів прийнято поділяти на два періоди: сталої та сповільненої швидкості сушіння. Перехід від сталої до сповільненої швидкості сушіння, який ще називають критичною вологістю деревини, визначити дуже важко, тому що величина критичної вологості залежить від температурно-вологісного стану середовища і матеріалу.

Насамперед потрібно описати закономірності зовнішнього тепло- і вологообміну між висушуваним мате-

ріалом і агентом сушіння, які є одним із визначальних чинників процесу. Кінетичні характеристики цих явищ, а саме коефіцієнти теплообміну і волого обміну, потрібні для аналізу і розрахунку самого процесу (Ozarkiv, Soroka & Hrytsiuk, 1997). Вони входять у формули для розрахунку тривалості процесу сушіння, в рівняння теплового балансу і балансу вологи, які потрібні також для характеристики об'єкта сушіння, для автоматичного регулювання процесу.

Об'єкти та методика дослідження. За експериментальний матеріал обрано соснові обрізні дошки завтовшки 40 мм, завширшки понад 150 мм і початковою вологістю деревини понад 60 %. Отже, отримані кінетичні характеристики порівнювали з уже опублікованими матеріалами. Процес сушіння проводили за м'яким режимом у лабораторній сушильній установці, яка укомплектована засобами для вимірювання вологості деревини (середню за товщиною, а також поверхневих і внутрішніх шарів), фіксації та регулювання параметрів середовища (температури і рівноважної вологості дере-

Інформація про авторів:

Лабай Володимир Йосипович, д-р техн. наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції. **Email:** wlabay@i.ua

Сорока Любомир Ярославович, канд. техн. наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини, безпеки життєдіяльності та соціальних комунікацій. **Email:** bzd@nltu.edu.ua

Цитування за ДСТУ: Лабай В. Й., Сорока Л. Я. Кінетичні характеристики конвективного процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(10). С. 86–88.

Citation APA: Labai, V. Yo., & Soroka, L. Ya. (2017). Kinetic Characteristics of Convection Drying Process of Capillary-Porous Colloidal Materials. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(10), 86–88. <https://doi.org/10.15421/40271015>

вину). Оброблення результатів експериментальних досліджень проводили за рекомендаціями фахової і спеціальної літератури (RTM, 1985; Bilei et al., 2010; Bilei, 2005; Sergovskii & Rasev, 1987; Bilei & Pavliust, 2008; Brunner – Hildebrand, 1987).

Результати дослідження та їх обговорення. Результати експериментальних досліджень процесу сушіння наведено у табл. 1, де внесено залежності середньої вологості деревини (W , %) та вологості поверхневих ($W_{пов}$) і внутрішніх шарів матеріалу від тривалості сушіння та рівноважна вологість деревини (W_p , %).

Табл. 1. Результати дослідження кінетики процесу сушіння пиломатеріалів сосни ($S_1 = 40$ мм)

№ з/п	Тривалість сушіння, $\tau \cdot 10^{-4}$, с	Інтервал часу сушіння $\Delta\tau \cdot 10^{-4}$, с	Вологість деревини W , %					
			$W_{пов}$	W_y	W	ΔW^*	W_p	
1	0	0	61,8	63,1	62,2	–	–	
2	4,32	4,32	50,6	56,5	54,6	7,6	13,0	
3	8,64	4,32	43,5	50,1	47,9	6,7	13,0	
4	12,96	4,32	35,0	45,0	41,7	6,2	12,0	
5	17,28	4,32	30,1	41,2	36,5	5,2	12,0	
6	21,60	4,32	25,5	36,7	31,9	4,6	12,0	
7	25,92	4,32	20,3	32,4	27,4	4,0	10,0	
8	30,24	4,32	17,4	27,4	24,4	3,5	10,0	
9	34,56	4,32	14,2	24,5	21,1	3,0	8,0	
10	38,88	4,32	12,0	21,6	18,4	2,7	8,0	
11	43,20	4,32	9,8	17,2	15,8	2,6	6,0	
12	47,52	4,32	6,9	15,6	14,7	2,1	6,0	
13	51,84	4,32	6,0	13,5	12,0	1,7	4,0	
14	56,16	4,32	5,6	12,1	10,5	1,5	4,0	
15	60,48	4,32	5,2	10,8	9,2	1,3	4,0	
Середнє значення			8,26	4,19	1,06	4,79	0,62	0,37

Примітка: *Зміна середньої вологості деревини.

За даними табл. 1 можна визначити основні кінетичні характеристики процесу сушіння за такими залежностями:

- швидкість сушіння $(\Delta W_i / \Delta \tau_i) \cdot 10^{-5}$, $\frac{\%}{\text{с}}$;

- коефіцієнт вологопровідності

$$a_m = \frac{(\Delta W_i / \Delta \tau_i) \cdot R}{(W_y - W_{пов})_i} \cdot 10^{-5}, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}; \quad (1)$$

- коефіцієнт вологовіддачі

$$\beta = \frac{(\Delta W_i / \Delta \tau_i) \cdot R}{(W - W_p)_i} \cdot 10^{-5}, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}; \quad (2)$$

- коефіцієнт сушіння

$$K_i = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{W_i - W_{pi}}{W_{i+1} - W_{pi}} \cdot 10^{-6}, \frac{1}{\text{с}}. \quad (3)$$

За величинами коефіцієнтів вологопровідності та вологовіддачі і швидкості сушіння можна визначити масообмінні критерії Нуссельта, Фур'є та Кірпічова, які описано такими формулами:

- критерій Нуссельта $Nu_m = \frac{\beta \cdot R}{a_m}; \quad (4)$

- критерій Фур'є $Fo_m = \frac{a_m \cdot \tau}{R^2}; \quad (5)$

- критерій Кірпічова $Ki_m = \frac{(\Delta W_i / \Delta \tau_i) \cdot R^2}{a_m \cdot W_{max}}. \quad (6)$

Кінетичні характеристики процесу сушіння пиломатеріалів сосни наведено у табл. 2.

Табл. 2. Кінетичні характеристики процесу сушіння

№ з/п	Швидкість сушіння $\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot 10^5$	Коефіцієнти			Критерії		
		вологовідності $a_m \cdot 10^5$, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	вологовіддачі $\beta \cdot 10^5$, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	сушіння $K \cdot 10^6$, $\frac{1}{\text{с}}$	Нуссельта Nu_m	Фур'є Fo_m	Кірпічова Ki_m
1	17,6	11,93	0,85	3,89	0,14	0,13	0,11
2	15,5	9,39	0,89	4,07	0,19	1,02	0,13
3	14,4	5,76	0,97	4,40	0,34	0,62	0,22
4	12,0	4,32	0,98	4,26	0,45	0,47	0,26
5	10,6	3,79	1,02	4,81	0,54	0,41	0,30
6	9,3	3,07	1,04	4,65	0,68	0,33	0,37
7	8,1	3,24	1,13	5,05	0,70	0,35	0,29
8	6,9	32,68	1,05	5,21	0,78	0,29	0,42
9	6,3	2,63	1,21	5,45	0,92	0,28	0,44
10	6,0	3,24	1,22	5,48	0,75	0,35	0,43
11	4,9	2,25	1,27	5,58	1,13	0,24	0,56
12	3,9	2,08	0,98	4,47	0,94	0,22	0,55
13	3,5	2,15	1,09	4,81	1,00	0,23	0,54
14	3,0	2,14	1,15	5,16	1,07	0,26	0,52
Середнє значення							
	8,26	4,19	1,06	4,79	0,62	0,37	0,37

Як видно з даних табл. 2, за результатами експериментальних досліджень соснових пиломатеріалів завтовшки $S_1 = 40$ мм з початковою вологістю $W_0 = 62,2$ %, та кінцевою $W_k = 9,2$ %, тривалість сушіння становить $\tau_c = 168$ год або $\tau_c = 7$ діб.

Отримано такі середні дані показників кінетики процесу сушіння:

- швидкість сушіння $\Delta W / \Delta \tau = 8,26 \cdot 10^{-5}$, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$;
- коефіцієнт вологопровідності $a_m = 4,19 \cdot 10^{-5}$, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$;
- коефіцієнт вологовіддачі $\beta = 1,06 \cdot 10^{-5}$, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$;
- коефіцієнт сушіння $K = 4,79 \cdot 10^{-5}$, $\frac{1}{\text{с}}$;
- масообмінний критерій Нуссельта $Nu_m = 0,62$;
- масообмінний критерій Фур'є $Fo_m = 0,37$;
- масообмінний критерій Кірпічова $Ki_m = 0,37$.

Висновки. Отримані результати експериментальних досліджень можна використати для сушіння пиломатеріалів сосни завтовшки від 19 до 75 мм з будь-якого початковою і кінцевою вологістю. Для розрахунку тривалості сушіння соснових пиломатеріалів завтовшки $S_1 = 40$ м можна скористатись середнім значенням коефіцієнта за формулою

$$\tau_c = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{W_n - W_p}{W_k - W_p}, \text{ с} \quad (7)$$

або для визначення тривалості сушіння соснових пиломатеріалів будь-якої товщини та значення початкової і кінцевої вологості за формулою

$$\tau_c = C_\tau \cdot \frac{65 \cdot S_1^2}{a_m \cdot 10^6} \cdot C \cdot A_p \cdot A_\phi \lg \frac{W_n}{W_k}, \text{ с} \quad (8)$$

де: C_τ – коефіцієнт, який залежить від товщини матеріалу; C – коефіцієнт, який враховує сповільнення процесу сушіння у штабелі; a_m – середнє значення коефіцієнта вологопровідності, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$; A_p – коефіцієнт, який враховує реверсивність циркуляції; A_ϕ – коефіцієнт, який залежить від відносної вологості повітря (як агента сушіння) на першому ступені режиму.

Значення масообмінного критерію Кірпічова, який ще називають критерієм тріщиноутворення, становить 0,37, що є меншим за допустиме значення $[Ki_m] = 1,0$. Тобто, у процесі сушіння внутрішні напруження будуть

незначними і не призведуть до утворення будь-яких тріщин (торцьових, пластових і внутрішніх).

За отриманими даними показників кінетики процесу сушіння і масообмінних критеріїв Нуссельта та Фур'є з доповненням до цих аеродинамічних характеристик сушильного обладнання, враховуючи критерій Рейнольдса, можна скласти фізико-математичну модель процесу сушіння пиломатеріалів і заготовок. Ця фізико-математична модель визначає вплив на кінетику процесу сушіння параметрів сушильного середовища, теплофізичних властивостей деревини та аеродинамічних характеристик сушильних камер.

Перелік використаних джерел

Bilei, P. V. (2005). *Teoretychni osnovy teplovoi obrobky i sushinnia derevyny*. Kolomyia: Vik. 364 p. [in Ukrainian].

Bilei, P. V., & Pavliust, V. M. (2008). *Sushinnia i zakhyst derevyny*. Lviv: Kolorove nebo. 312 p. [in Ukrainian].

Bilei, P. V., Sokolovskiy, I. A., Pavliust, V. M., & Kunynets, Ye. P. (2010). *Kerivni tekhnichni materialy z tekhnolohii kamernoho sushinnia pylomaterialiv*. Uzhhorod: Karpaty. 140 p. [in Ukrainian].

Brunner – Hildebrand. (1987). *Die Schnitholz-trocknung (S. Auflage) Buchdruckverktatten*. Hannover. Gm.bH. 322 p.

RTM. (1985). *Rukovodiashhie tekhnicheskie materialy po tekhnologii kamernoi sushki drevesiny*. Arkhangel'sk: TcNIIMOD. 143 p. [in Russian].

Ozarkiv, I. M., Soroka, L. Ya., & Hrytsiuk, Yu. I. (1997). *Osnovy aerodynamiky i teplomasoobminu: navch. posibnyk*. Kyiv: Vyd-vo IZMN. 280 p. [in Ukrainian].

Sergovskii, T. K., & Rasev, A. I. (1987). *Gidrotermicheskaia obrabotka i konservirovanie drevesiny*. Moscow: Lesnaia promyshlennost. 360 p. [in Russian].

В. И. Лабай¹, Л. Я. Сорока²

¹ *Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов, Украина*

² *Национальный лесотехнический университет Украины, г. Львов, Украина*

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ КОЛЛОИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Определено, что сложность тепломассообменных процессов деревообработки состоит, собственно, в сложности явлений переноса тепла и влаги, как внутри материала, так и на границе разделения фаз среда – твердое тело и сложности изменения физико-механических характеристик древесины во время тепловой обработки. Как экспериментальный материал принято составные пиломатериалы толщиной 40 мм, которые высушиваются мягкими режимами. В основу исследования положено построение кривой сушки, где указано на изменение средней влажности и влажности поверхностных и внутренних слоев древесины во время сушки. По этим данным определены величины: скорости сушки, коэффициенты сушки, влагопроводности и влагообмена, а также величины массообменных критериев Нуссельта, Фурье и Кирпичева. За величинам коэффициента сушки можно определить продолжительность сушки пиломатериалов из древесины сосны толщиной 40 мм какой-либо начальной и конечной влажности, а по величинам коэффициента влагопроводности можно определить продолжительность процесса каких – либо сосновых пиломатериалов различной толщины, начальной и конечной влажности и других характеристик процесса сушки. Определение массообменного критерия Кирпичева (критерия трещинообразования) показывает насколько избранный режим сосны безопасен с точки зрения возникновения излишних внутренних напряжений в древесине. По полученным данными показателей кинетики процесса сушки и массообменных критериев Нуссельта и Фурье с дополнением к этим данным аэродинамических характеристик сушильного оборудования, включая критерий Рейнольдса, можно составить физико-математическую модель процесса сушки пиломатериалов и заготовок. Эта модель определяет влияние на кинетику процесса сушки параметров среды теплофизических свойств древесины и аэродинамических характеристик сушильных камер.

Ключевые слова: древесина; влажность; влагопроводность; влагообмен; коэффициент сушки; продолжительность процесса.

V. Yo. Labai¹, L. Ya. Soroka²

¹ *Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

² *Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine*

KINETIC CHARACTERISTICS OF CONVECTION DRYING PROCESS OF CAPILLARY-POROUS COLLOIDAL MATERIALS

It is known that the complexity of the heat-and-mass exchange processes in woodworking consists in the complexity of the phenomena of heat-and-moisture transfer both within the material and at the phase interface environment-solid body, as well as the complexity of changing physical-and-mechanical characteristics of wood during heat treatment. The test material was pine lumber with a thickness of 40 mm, which had been dried by a soft drying schedule. The objective of the study is the construction of the drying curve which indicates the change in the average moisture and the moisture content of the surface and middle layers of wood during drying. By this data, the values were found for drying rate, drying coefficients, moisture conductivity and moisture-yielding ability, as well as mass-exchange numbers of Nusselt, Fourier, and Kirpichov. By the values of the drying coefficient, we can determine the drying time for 40 mm thick pine-wood lumber of any initial and final moisture content, and by the magnitude of the conductivity coefficient we can determine drying time for any pine wood of various thicknesses and various initial and final moisture and other characteristics of the drying process. Determination of mass exchange number of Kirpichov (criterion of crack formation) shows how the selected mode is safe in terms of the occurrence of excessive internal stresses in wood. Thus, a physical-mathematical model of the process of drying of lumber and blanks can be constructed using the obtained data on the kinetics of the drying process as well as Nusselt's and Fourier's mass exchange criteria, with the addition to this of the aerodynamic characteristics of the drying equipment, including the Reynolds criterion. This physical-mathematical model identifies the influence of the drying environment parameters, the thermophysical properties of the wood and the aerodynamic characteristics of the drying chambers on the kinetics of the drying process.

Keywords: wood; moisture; moisture conductivity; moisture-yielding ability; drying coefficient; process time; kinetic characteristics; capillary-porous colloidal materials.