

УДК 674.04:674.038.18

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИНИ РІЗНИХ ПОРІД

**О. О. ПІНЧЕВСЬКА**, доктор технічних наук, професор

**В. М. НЕСВІДОМІН**, доктор технічних наук, професор кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну

**А. К. СПІРОЧКІН**, кандидат технічних наук

**О. Ю. ГОРБАЧОВА**, асистент

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: OPinchewska@gmail.com; a.spirochkin@gmail.com;*

*gorbachova.sasha@ukr.net*

**Анотація.** У статті наведено основні результати експериментальних досліджень кінетики низькотемпературного сушіння пилопродукції для визначення термодинамічних параметрів найпоширеніших промислових порід деревини: дуба, сосни і вільхи. Отримані результати дають змогу розрахувати термодинамічні коефіцієнти в рівнянні поточної вологості пилопродукції на кожному етапі низькотемпературного сушіння за будь-якої температури в сучасних камерах. На основі розв'язку цього рівняння щодо часу, запропоновано метод розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння з урахуванням термодинамічних особливостей процесу в сучасних камерах. Наведено методiku проведення і результати аналізу експериментальних досліджень з визначення деяких фізико-механічних та технологічних властивостей термомодифікованої різними режимами деревини граба. Встановлено, що під дією високих температур залежно від режимних параметрів оброблення деревина граба змінює забарвлення від світло-коричневих до чорних кольорів. Визначено, що після термооброблення деревину граба неможливо використовувати як резонансний матеріал. На механічні та технологічні властивості деревини граба термомодифікація впливає неоднозначно.

**Ключові слова:** теплове оброблення, пилопродукція, дуб, сосна, вільха, граб, ефективне використання, низькотемпературне сушіння, якість, термічне модифікування, фізико-механічні властивості.

Актуальність. Деревина є цінною екологічно чистою виробничою сировиною, яку широко використовують у різних галузях промисловості. У лісовому фондї зони змішаних лісів найбільшу питому вагу мають соснові, сосново-дубові, дубово-грабові і вільхові ліси. Сьогодні в Україні через значний експорт пиломатеріалів листяних порід виникла нестача сировини, що призвело до зростання цін на пилопродукцію. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є забезпечення використання непромислових порід, таких як граб, за рахунок покращення їхніх властивостей.

Нині пилопродукцію промислових порід дедалі більше використовують як конструкційний матеріал, і вироби з неї повинні мати високі показники міцності. Тому режими сушіння мають бути низькотемпературними, адже вплив температури  $t \leq 60$  °C за будь-якої тривалості обробки не знижує експлуатаційної міцності деревних виробів. Традиційно для розрахунку тривалості низькотемпературного сушіння використовують рівняння вологопровідності, що призводить до значної (30–50 %) похибки. Врахування термодинамічних особливостей перебігу процесу дасть змогу розробити алгоритм розрахунку тривалості саме низькотемпературного сушіння.

Поліпшення основних фізико-механічних властивостей граба і розширення сфери його використання можна досягти шляхом модифікування під дією високої температури. Порівняно з необробленою для термомодифікованої деревини характерні насичений колір по товщині матеріалу, стабільність розмірів, біостійкість. Це значно розширює її сферу використання, тому актуальним є розроблення раціональних режимів термомодифікування деревини граба.

**Мета досліджень** – визначення особливостей теплової обробки деревини за різних рівнів температурних впливів.

**Матеріали та методика дослідження.** Для описання процесу сушіння в сучасних низькотемпературних камерах використовують рівняння кінетики сушіння, що враховує комплексну дію вологопровідності та термовологопровідності [1], розв'язок якого щодо часу вимагає пояснення та визначення фізичного змісту термодинамічних коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$ .

Відомо, що кінетичний процес видалення вологи з деревини відбувається за експоненціальним законом. Це дає змогу розглядати його з позиції релаксаційних процесів і подати у вигляді рівняння:

$$m_{nom} = m_n e^{-\frac{t_{ium}}{\tau_1}}, \quad (1)$$

де  $m_{nom}$  – маса вологого зразка в процесі сушіння через інтервал часу

$t_{ium}$ ;

$m_n$  – маса зразка на початку процесу сушіння;

$\tau_1$  – час релаксації процесу видалення вологи з деревини.

Попередні експериментальні дослідження кінетики сушіння за різних температур дали змогу встановити наявність активаційного механізму в процесах низькотемпературного сушіння деревини. Визначено аналітичний зв'язок між термодинамічними коефіцієнтами  $K_1$  і  $K_2$  та часом релаксації:

$$K_1 = 1/\tau_1, \quad (2)$$

$$K_2 = 1/\tau_2. \quad (3)$$

Наявність температурної залежності кінетики сушіння дає можливість подати ці релаксаційні процеси в арреніусівській формі:

$$\tau_1 = \tau_{0_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT}}, \quad (4)$$

$$\tau_2 = \tau_{0_2} e^{\frac{E_{a2}}{kT}}, \quad (5)$$

де  $E_{a1}$  та  $E_{a2}$  – енергії активації, що характеризують процес видалення вологи з деревини вологістю, відповідно, нижче та вище межі насичення;

$\tau_{0_1}$ ,  $\tau_{0_2}$  – передекспоненційні множники, що відповідають абсолютно сухому стану деревини.

Для підтвердження запропонованого феноменологічного трактування термодинамічних коефіцієнтів рівняння кінетики низькотемпературного сушіння проведено експериментальні дослідження на зразках із деревини сосни, вільхи і дуба за відповідними методиками [2].

Для встановлення раціональних режимів термічного модифікування деревини граба, результат дії яких зумовлює сферу використання, були визначені фізико-механічні та технологічні властивості отриманого матеріалу за стандартними методиками [3–5]: колір ( $\Delta E$ ), базова густина ( $\rho_{баз}$ , кг/м<sup>3</sup>), показники всихання ( $\beta_{рад}$ ,  $\beta_{танг}$ , %), величина вологопоглинання ( $U_p$ , %), акустичний опір ( $K$ , м<sup>4</sup>/кг·с); межа міцності при статичному згині ( $\sigma_{стат. згин}$ , МПа) і стиску уздовж та поперек волокон ( $\sigma_{ст. уздовж вол.}$ ,  $\sigma_{ст. поп. вол.}$ , МПа); ударна твердість ( $H$ , Дж/см<sup>2</sup>) і зносостійкість ( $t$ , %).

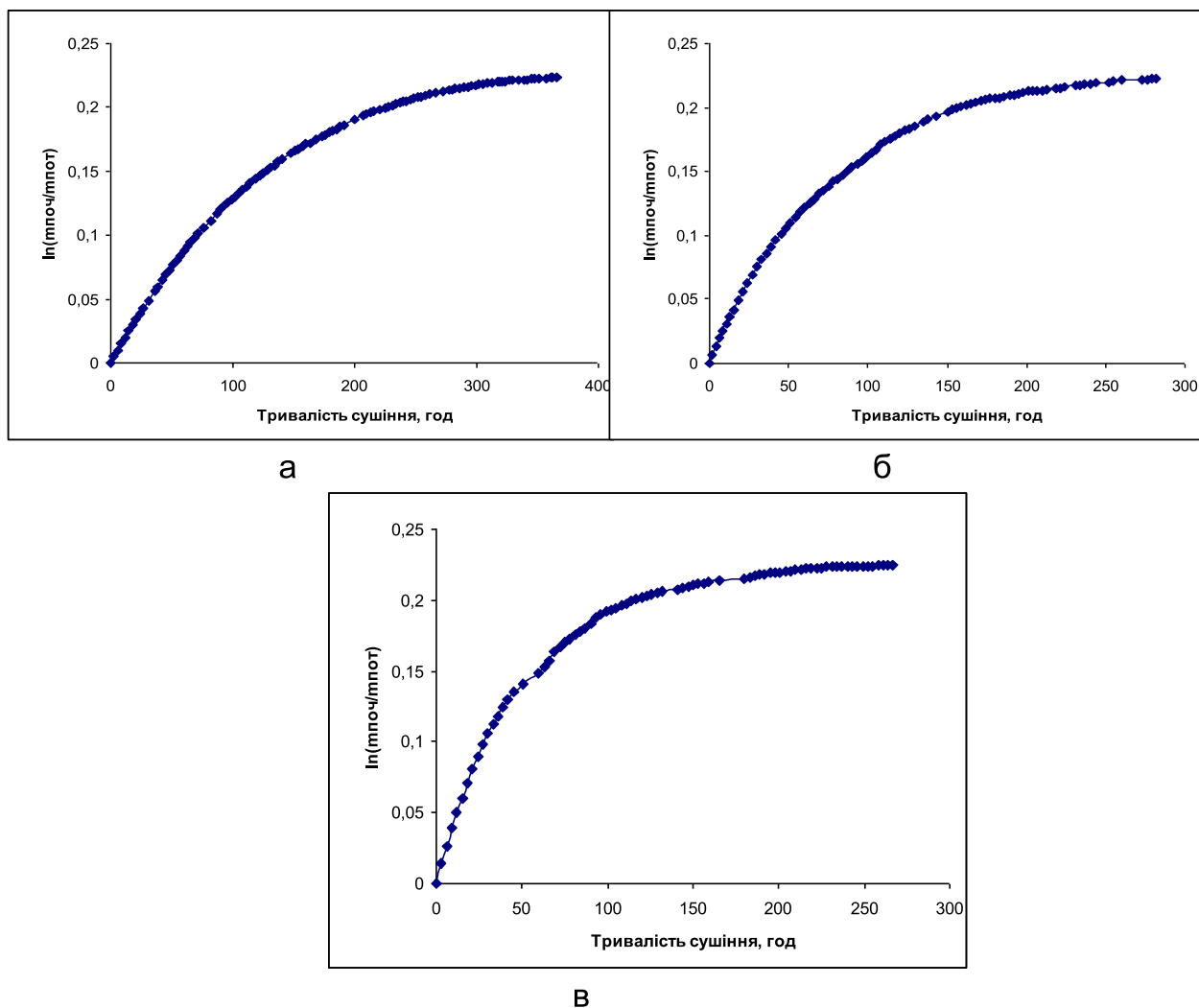
**Результати дослідження.** Досліди проводили в лабораторному пристрої за такими режимними параметрами:  $t = 160\text{--}220$  °С,  $\tau = 1\text{--}20$  год.

У результаті проведених досліджень кінетики низькотемпературного сушіння для кожного зразка побудовані логарифмічні криві як відношення початкової маси зразка  $m_{поч}$  до поточної  $m_{пот}$  (рис. 1).

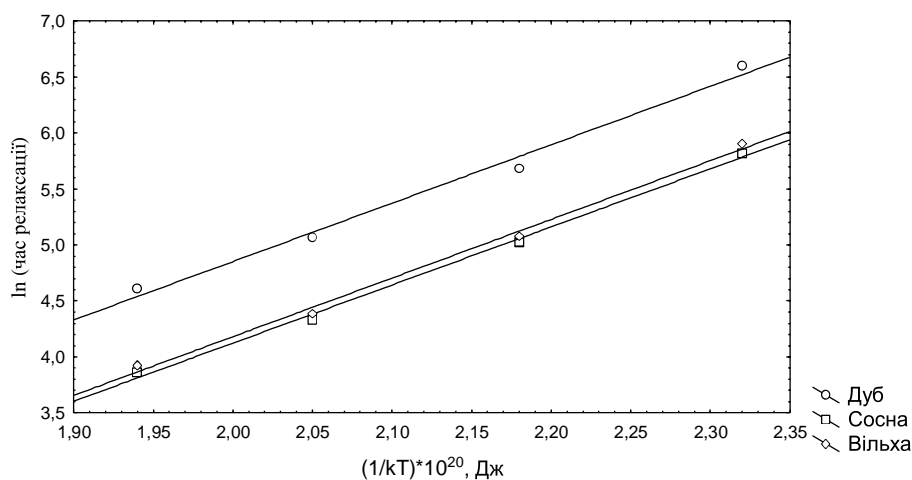
Шляхом графічного диференціювання знайдено час релаксації для кожної породи за різних температур (табл. 1).

### 1. Час релаксації сушіння деревини різних порід

Температура середовища Т, °С	Час релаксації $\tau_1$ , год.		
	Дуб	Сосна	Вільха
40	618	297	317
60	316	152	162
80	175	84	90



**Рис. 1.** Усереднені логарифмічні кінетичні криві відношення початкової маси  $m_{поч}$  до поточної  $m_{пот}$  у процесі сушіння зразків за температури 40 °С: а – дуб, б – вільха, в – сосна



**Рис. 2.** Логарифмічна залежність часу релаксації від оберненої температури

Енергію активації процесу видалення вологи з деревини визначали за допомогою методу Арреніуса з графічних логарифмічних залежностей часу релаксації  $\tau_1$  від температури. Особливості низькотемпературного сушіння пов'язані з вузьким інтервалом температур, де залежність  $\ln \tau_1$  від  $1/T$  виявилася лінійною. Це дало змогу не враховувати значення  $\tau_{0_1}$  під час розрахунку енергії активації, оскільки вона визначається виключно кутом нахилу цієї прямої (рис. 2).

Розрахунки показали, що видалення вологи з деревини усіх досліджуваних порід характеризується однаковою енергією, її значення становить  $E_{a_1} = 0,30 \pm 0,03 \text{ eB}$ .

Припинення активаційного механізму в процесі низькотемпературного сушіння, що відповідає абсолютно сухому стану деревини, характеризується передекспоненційним множником  $\tau_{0_1}$ . Кількісні значення  $\tau_{0_1}$  визначаються шляхом екстраполяції прямої. Встановлено, що вони залежать від густини деревини і становлять: для дуба  $\tau_{0_1} = 0,009026$  год, для сосни  $\tau_{0_1} = 0,004347$  год, для вільхи  $\tau_{0_1} = 0,004627$  год, що зумовлено особливостями мікроскопічної будови різних порід деревини.

Для визначення термодинамічних характеристик стадії початкового прогрівання матеріалу були проведені експериментальні дослідження кінетики низькотемпературного сушіння пилопродукції в промислових умовах. Отримано значення зміни вологості та режимних параметрів у процесі сушіння, за якими побудовано експериментальні та розрахункові криві кінетики. Проведено 16 сушінь у промислових умовах, що уможливило встановити S-подібний характер кривих кінетики сушіння, яке пояснюється виникненням «уявного» джерела вологи [6].

Для визначення температурної залежності потужності «уявного» джерела вологи проведено дослідження за різних температур і встановлено, що максимальна потужність зростає зі збільшенням температури. Визначено, що період розвитку джерела вологи до максимального значення є незмінним для різних порід у проміжку температур 50–80 °С. Наявність температурної залежності затухання потужності «уявного» джерела вологи дала змогу виявити присутність активаційного механізму в його життєвому циклі.

Значення енергії активації «уявного» джерела вологи визначені із залежності  $\ln \tau_2$  від  $1/T$  методом графічного диференціювання, а передекспоненційний множник  $\tau_{0_2}$  встановлено шляхом екстраполяції прямих (табл. 2).

## 2. Параметри «уявного» джерела вологи і його життєвого циклу у процесі низькотемпературного сушіння різних порід деревини

Порода	Дуб		Сосна		Вільха	
T, °C	50	80	52	80	52	80
a, %/год	0,1190	0,3061	0,1578	0,4055	0,1736	0,4578
b, %/год <sup>2</sup>	0,0004	0,0012	0,0012	0,0032	0,0014	0,0041
$\tau_2$ , год	559	1189	316	458	270	1563
$\tau_{0_2}$ , год	$4,0 \times 10^6$		$3,4 \times 10^4$		$9,7 \times 10^{11}$	
Ea <sub>2</sub> , eВ	0,25		0,13		0,62	

Отримані результати дали змогу визначити термодинамічні коефіцієнти  $K_1$  і  $K_2$ . Зіставлення розрахункових значень тривалості сушіння з експериментальними даними підтверджує гіпотезу про можливість уявлення сушіння деревини релаксацийним процесом (рис. 3).

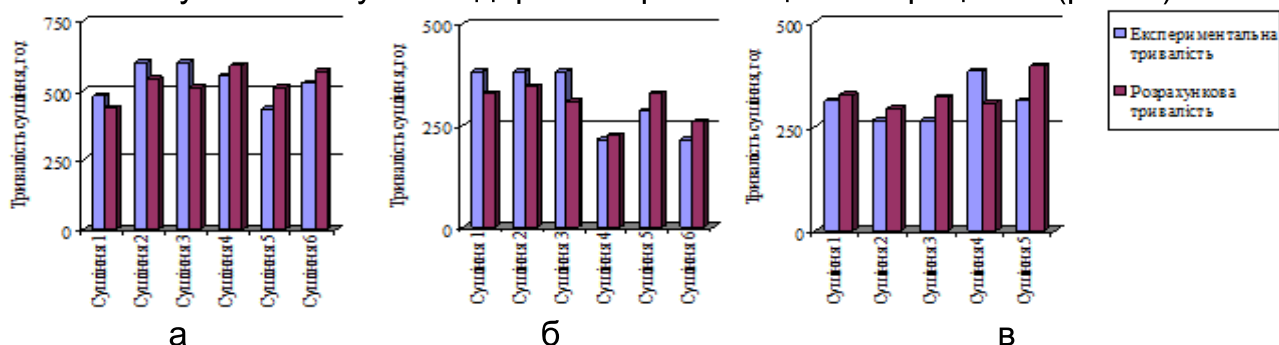


Рис. 3. Порівняння розрахункової та експериментальної тривалості сушіння пиломатеріалів товщиною 30 мм: а – дуб; б – вільха; в – сосна

Під час термічного модифікування зразки деревини граба змінили свій колір відповідно до обраних режимних параметрів і набули забарвлення, характерного для екзотичних порід деревини. Отримано рівняння регресії у нормалізованому вигляді залежності кольору термомодифікованої деревини граба від режимних параметрів:

$$\Delta E = 23,59 + 14,46 \cdot x_1 + 5,89 \cdot x_2 + 3,56 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6)$$

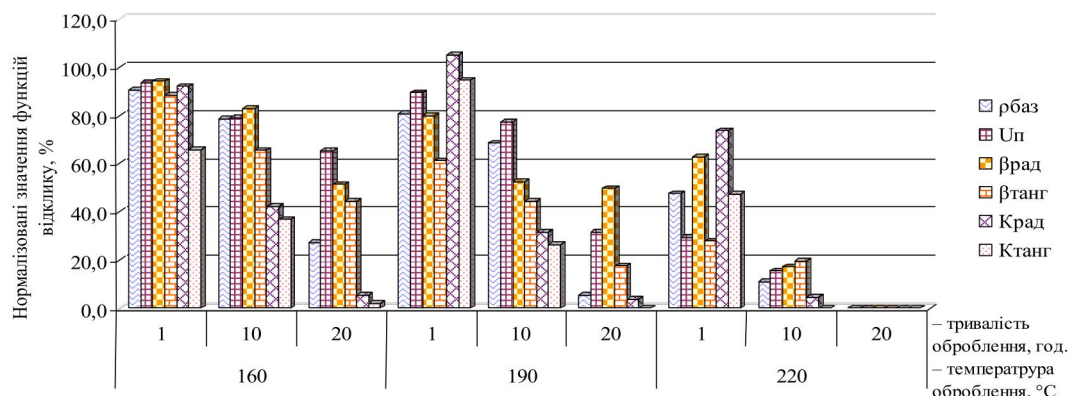
де  $x_1$  – температура оброблення, °C;

$x_2$  – тривалість оброблення, год.

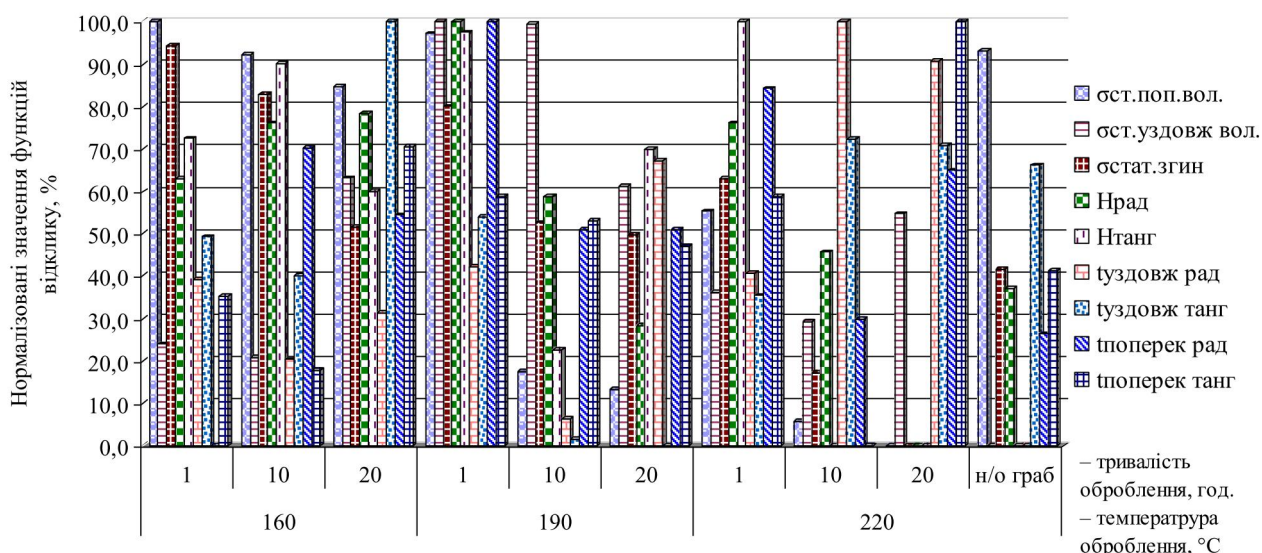
Вплив температури й тривалості оброблення на досліджувані фізичні, механічні і технологічні властивості виявився неоднаковим (рис. 4, 5).

Зі зростанням температури й тривалості оброблення, вологопоглинання зменшується в 1,4 разу; величина всихання падає в тангентальному напрямку в 3 рази і в радіальному – в 1,7 разу, порівняно зі зразками необробленої деревини граба. Втрата маси зразків, у результаті впливу температури, спричинила зменшення густини деревини граба на 7 і 10 % при обробленні м'якими та жорсткими режимами відповідно. Термічне модифікування забезпечує зниження акустичного опору для зразків, модифікованих за температури 220 °C, в радіальному

напрямку в 40 разів і в тангентальному – у 20 разів, порівняно з необробленою деревиною.



**Рис. 4. Вплив режимів термічного модифікування на фізичні властивості деревини граба**



**Рис. 5. Вплив режимів термічного модифікування на механічні та технологічні властивості деревини граба**

Дія температури 190 °С збільшує межу міцності при стиску уздовж волокон та статичному згині; спостерігається значне зменшення межі міцності при стиску поперек волокон після термомодифікування деревини температурою вищою за 160 °С.

Модифікування деревини м'якими режимами незначно поліпшило показник ударної твердості на 10 % і 13 % на радіальній і тангентальній поверхні; стійкість до стирання уздовж та поперек волокон термомодифікованої деревини граба різними режимами не змінилася, порівняно з необробленою деревиною. Термомодифіковану деревину граба можна розглядати як заміну екзотичних та твердолистяних порід деревини при оформленні прилеглої до будинку території (фасади будинків, терасна дошка, садові меблі) та інтер'єру (сходи, вагонка, покриття підлоги, фасади кухонних меблів, стільниці), оскільки вона має

покращені декоративні характеристики, фізичні та експлуатаційні властивості.

**Висновки і перспективи.** Встановлено, що процес низькотемпературного сушіння пилопродукції містить активаційний механізм, термодинамічним параметром якого є енергія активації, значення якої для різних порід становить  $E_{a_1} = 4,8 \times 10^{-20}$  Дж. Визначено енергію активації потужності джерела вологи  $E_{a_2}$ , за якої встановлено температурну залежність часу релаксації джерела вологи  $\tau_2$ .

Отримані значення термодинамічних коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  дали змогу розрахувати термін низькотемпературного сушіння пилопродукції з деревини сосни, вільхи та дуба, який незначно (3–7 %) відрізняється від експериментальних даних.

Встановлено, що дія високих температур на деревину граба сприяє зміні забарвлення деревини граба від світло-коричневих до чорних кольорів залежно від режимних параметрів.

Визначено, що більший вплив на величину всихання в тангентальному напрямку та вологопоглинання має температура, а на густину деревини та всихання в радіальному напрямку вагомим фактором впливу є тривалість оброблення. Визначення акустичного опору термічно модифікованої деревини граба показало неможливість її використання як резонансного матеріалу. На механічні та технологічні властивості деревини граба термомодифікація впливає неоднозначно.

#### Список використаних джерел

- 1) Pinchevska O. Quality assessment of lumber after low temperature drying from the view of stochastic process characteristics / O. Pinchevska, A. Spirochkin, J. Sedliacik, R. Oliynyk // Wood research. – 2016. – Vol. 61 (6). – P. 871–884.
- 2) Пінчевська О. О. Фізика низькотемпературного сушіння пилопродукції / О. О. Пінчевська, Р. В. Олійник, А. К. Спірочкін // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. – 2014. – Вип. 24.3. – С. 114–118.
- 3) Hill C. A. S. Wood modification – chemical, thermal and other processes. – John Wiley & Sons Ltd, Chichester UK, 2006. – P. 239.
- 4) Основные технологии термомодификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.estw.ru/tecnology.html>.
- 5) Пинчевская Е. А. Влияние режимов термического модифицирования на физико-механические свойства граба / Е. А. Пинчевская, В. М. Головач, А. Ю. Горбачева // Annals Warsaw University of Life Sciences. SGGW Forestry and Wood Tecnology. – 2014. – № 88. – С. 193–197.
- 6) Пінчевська О. О. Низькотемпературне сушіння пилопродукції [монографія] / О. О. Пінчевська, А. К. Спірочкін, Р. В. Олійник. – К. : Центр учбової літератури, 2016. – 124 с.



## References

1. Pinchevska, O., Spirochkin, A., Sedliacik, J., Oliynyk, R. (2016). Quality assessment of lumber after low temperature drying from the view of stochastic process characteristics. *Wood research*, 61(6), 871–884.
2. Pinchevska, O. O., Oliynyk, R. V., Spirochkin, A. K. (2014). Fizyka nyzkotemperaturnogo sushynnya pyloprodukciiyi [Physics of low-temperature drying saw timber]. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 24. 3, 114–118.
3. Hill, C. A. S. (2006). *Wood modification – chemical, thermal and other processes*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester UK, 239.
4. Main technology of thermal modification. Available at: <http://www.estw.ru/tecnology.html>.
5. Pynchevskaya, E. A., Golovach, V. M., Gorbacheva, A. Yu. (2014). Vlyyanye rezhyrov termicheskogo modyfycirovaniya na fizyko-mehanycheskiye svojstva graba [Influence of thermal modification schedules on the physical and mechanical properties of hornbeam wood]. *Annals Warsaw University of Life Sciences. SGGW Forestry and Wood Tecnology*, 88, 193–197.
6. Pinchevska, O. O., Spirochkin, A. K., Oliynyk, R. V. (2016). Nyzkotemperaturne sushynnia pyloproduktii [Saw timbers low temperature drying], Kyiv: Center of educational literature, 124.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ РАЗНЫХ ПОРОД

**Е. А. Пинчевская, В. М. Несвидомин, А. К. Спирочкин, А. Ю. Горбачева**

**Аннотация.** В статье представлены основные результаты экспериментальных исследований кинетики низкотемпературной сушки пилопродукции для определения термодинамических параметров наиболее распространенных промышленных пород древесины: дуба, сосны, ольхи. Полученные результаты позволяют рассчитать термодинамические коэффициенты в уравнении текущей влажности пилопродукции на каждом этапе низкотемпературной сушки при любой температуре в современных камерах. Основываясь на решении этого уравнения относительно времени, предложен метод расчета продолжительности низкотемпературной сушки с учетом термодинамических особенностей процесса в современных камерах. Приведена методика проведения и результаты анализа экспериментальных исследований по определению некоторых физико-механических и технологических свойств термомодифицированной различными режимами древесины граба. Установлено, что под действием высоких температур в зависимости от режимных параметров обработки древесина граба меняет окраску от светло-коричневых до черных цветов. Определено, что после термообработки древесины граба нельзя использовать как резонансный материал. На механические и технологические свойства древесины граба термомодификация влияет неоднозначно.

**Ключевые слова:** *тепловая обработка, пилопродукция, дуб, сосна, ольха, граб, эффективное использование, низкотемпературная сушка, качество, термическое модифицирование, физико-механические свойства.*

## **FEATURES OF HEAT TREATMENT DIFFERENT SPECIES WOOD**

**O. Pinchevska, V. Nesvidomin, A. Spirochkin, O. Gorbachova**

**Abstract.** *The article presents the main results of sawn timber low-temperature drying kinetics experimental studies to determine the thermodynamic parameters of the most common commercial species of wood: oak, pine, alder. The results allow to calculate the thermodynamic factors in the equation of the sawn timber current moisture content at each stage of the low-temperature drying at any temperature in the modern chambers. Taking into account the thermodynamic characteristics of the process in modern chambers it is proposed a method for calculating the duration of the low-temperature drying based on the solution of the equation according to time. The method and the results of experimental research to determine some physical, mechanical and technological properties hornbeam wood thermomodified by different modes are given. Established that the high temperatures according to regime parameters changed colour wood hornbeam from light brown to black. Determined that after the heat treatment the hornbeam wood can not be used as resonant material. Heat treatment has ambiguous influence on the mechanical and technological properties of hornbeam wood.*

**Keywords:** *heat treatment, saw timber, oak, pine, alder, hornbeam, effective use, low-temperature drying, quality, thermal modification, physical and mechanical properties.*

**УДК 614.842**

## **МОДЕЛЬ РОБОТИ ІНТУМЕСЦЕНТНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ДЕРЕВИНИ**

**Ю. В. ЦАПКО**, доктор технічних наук,

**О. Ю. ЦАПКО**,

**Г. Б. ІНОЗЕМЦЕВ**, доктор технічних наук,

**Національний університет біоресурсів і природокористування України**

**І. Г. ГРАБАР**, доктор технічних наук

**Житомирський національний агроекологічний університет**

*E-mail: juriyts@ukr.net*

**Анотація.** *Розроблено фізичну модель процесу займання деревини та її математичну інтерпретацію, особливістю якої є наявність потужності виділення (поглинання) теплоти при термічному розкладі*