

3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ЛІСОВИРОБНИЧОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 674.047 Проф. П.А. Бехта, д-р техн. наук – НЛТУ України, м. Львів;
ст. наук. співроб. О.О. Пінчевська, канд. техн. наук –
Національний аграрний університет, м. Київ

ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ У КАМЕРАХ З ВОДЯНИМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ

Встановлено, що прогнозування якості сушіння за існуючим алгоритмом розрахунку розсіювання кінцевої вологості пиломатеріалів у камерах з водяним теплопостачанням не відповідає експериментальним даним, що пов'язано з відсутністю температурної складової у рівнянні для математичного сподівання. Запропоновано описання процесу сушіння з врахуванням термовологопровідності, на підставі якого отримані рівняння кінетики сушіння пиломатеріалів різних порід, які використано для розрахунку можливого середнього квадратичного відхилення кінцевої вологості пиломатеріалів за умови висушування в камерах з різними аеродинамічними характеристиками.

*Prof. P.A. Bekhta – NUFWT of Ukraine, L'viv;
Senior research officer O.O. Pinchevska – NAU of Ukraine, Kyiv*

The prognosis of drying quality sawn timbers in water-supply heating chambers

Were determined, that prognosis of drying quality by Feller's algorithm of calculation final moisture content dispersion in water-supply heating chambers don't correspond to experiments. Such result is concerning with absence the temperature component in the equation for mathematical expectation. Are proposed the description of drying process with the register of thermo-moisture permeability and adequate equations of different wood species drying kinetic, witch used for prognosis of sawn timbers final moisture content dispersion during drying in chambers with different aerodynamic characteristics.

Якість сушіння пиломатеріалів традиційно визначають після проведення процесу, тобто за фактом, коли істотна зміна наслідків потребує додаткових енерговитрат. Вироби, зроблені з неякісно висушеної деревини, можуть руйнуватися, змінювати свою форму вже в процесі експлуатації, що призводить до незворотних втрат такого цінного продукту, як деревина. Тому розроблення механізму прогнозування якості сушіння пиломатеріалів позбавить споживача від незапланованих втрат та гарантує якість сушіння в камерах за певною категорією якості сушіння.

Одним з показників якості сушіння пилопродукції є рівномірність розподілення бажаної кінцевої вологості в партії висушеного матеріалу. Її прийнято оцінювати за величиною середнього квадратичного відхилення в межах $\pm 2S_{W_k}$ [1, 2]. Отже, кінцева вологість пиломатеріалів W_k є випадковою величиною з гаусовим розподіленням [3].

Досягнення окресленої вимогами КТМ величини $\pm 2S_{W_k}$ залежить від багатьох факторів, в тому числі і від інших випадкових величин – початкової

вологості, теплофізичних властивостей деревини, розподілення аеродинамічних полів у сушарці. Тобто процес сушіння пиломатеріалів має стохастичний характер.

Щоб розрахувати можливе відхилення кінцевої вологості окремих дощок в партії $\pm 2S_{W_k}$, слід розв'язати задачу динаміки сушіння пиломатеріалів з випадковими граничними та початковими умовами. М.Н. Феллер [4, 5] побудував таку стохастичну модель сушіння необмеженої пластини і склав рівняння для моментів першого та другого порядку. Їх розв'язком є алгоритм розрахунку дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів за умови уявлення випадковими таких величин – початкової та рівноважної вологості пиломатеріалів, коефіцієнта вологообміну.

Розрахунки за отриманим алгоритмом та їх експериментальна перевірка показали задовільні результати у разі застосування технології сушіння з попереднім нагріванням пиломатеріалів у насиченому середовищі за підвищеної температури сушильного агента. За умови висушування пиломатеріалів у сушарках з водяним теплозабезпеченням, коли відтворення описаного початкового прогрівання матеріалу є економічно не вигідним, спостерігалася значна розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними розсіювання кінцевої вологості.

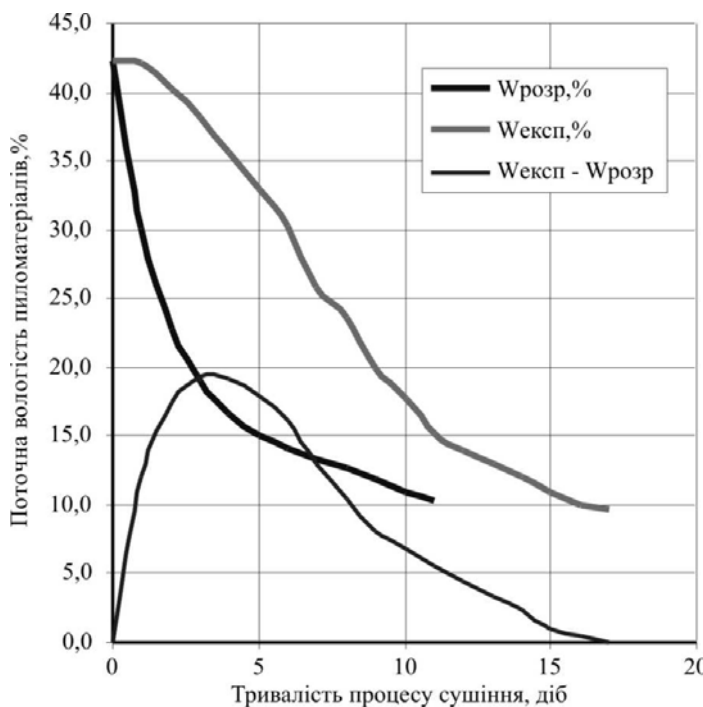


Рис. 1. Криві сушіння соснових пиломатеріалів товщиною 50 мм:

$W_{розр}$ розрахована за рівнянням вологопровідності, $W_{експ}$ отримана під час сушіння в камерах із водяним теплопостачанням у виробничих умовах, $W_{розр} - W_{експ}$ різниця між розрахунковою та експериментальною кривими

Аналіз кінетики сушіння в цих камерах показав, що зміна в часі поточної вологості відбувається не за експоненціальною залежністю, а має складний характер, обумовлений нестационарним тепловим полем, що впливає на перерозподіл води в деревині. Застосування рівняння вологопровідності для описання кінетики процесу дає значну похибку (рис. 1), особливо на початку процесу сушіння.

Така різниця між розрахунковими та експериментальними даними може бути апроксимована виразом:

$$\Delta U = (U_0 - U_p) [Ae^{-\alpha\tau} - Be^{-\beta\tau}], \quad (1)$$

де α, β, A, B – коефіцієнти.

Рівняння (1) відповідає введенню додаткового джерела зволоження у вираз для визначення математичного сподівання зміни вологості в штабелі

протягом сушіння, яке змінюється за експоненціальним законом. Тому для врахування температурної складової на процес перерозподілу вологи в необмеженій пластині було використано рівняння, яке імітує вплив температурних полів шляхом введення джерела вологи у вигляді:

$$U = U'_0 e^{-k\tau}, \quad (2)$$

де: U'_0 – максимальна потужність джерела; k – постійна, яка враховує відносну швидкість зміни питомої потужності джерела.

Уявлення процесу сушіння пиломатеріалів у лісосушарках із водяним теплопостачанням, як результат комплексної дії явища вологопровідності та термовологопровідності з внутрішнім джерелом вологи, перетворює задачу динаміки зміни вологості, тобто першого моменту, на рівняння:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{U'_0 e^{-k\tau}}{c \rho_0} \quad (3)$$

за початкових
$$U(x, 0) = U_0 - const \quad (4)$$

$$\frac{\partial U(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

і граничних умов
$$-a' \frac{\partial U(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [U_p - U(R, \tau)] = 0. \quad (6)$$

Розв'язок цієї задачі з використанням зворотних методів теплопровідності та масообміну [6-8], дав змогу отримати рівняння кінетики сушіння [9, 10] для пиломатеріалів різних порід та розмірів за товщиною. Знайдені рівняння зміни математичного сподівання вологості пиломатеріалів протягом часу в камерах з водяним теплозабезпеченням дають змогу підрахувати розсіювання кінцевої вологості пиломатеріалів з врахуванням флуктуацій поточної вологості, що виникають під час зміни параметрів режиму:

$$S_{W_k} = \pm \sqrt{\left(\frac{W_{nep}^{(n)} - W_p^{(n)}}{W_{nep}^{(n-1)} - W_p^{(n)}} \right)^2 d_W^{(n-1)} + d_{W_p}^{(n)}}, \quad (7)$$

де: n – індекс етапу режиму; $W_{nep}^{(n)}$ – значення перехідної вологості на n -ому етапі режиму; $W_{nep}^{(n-1)}$ – значення перехідної вологості на попередньому етапі режиму, для початкових умов $W_{nep}^{(n-1)} = W_0$; W_0 – початкова вологість матеріалу; $W_p^{(n)}$ – рівноважна вологість на n -ому етапі режиму; $d_{W_p}^{(n)}$ – дисперсія рівноважної вологості на n -ому етапі режиму; $d_W^{(n-1)}$ – дисперсія поточної вологості на $(n-1)$ -ому етапі режиму, при $n=0$ дорівнює дисперсії початкової вологості d_{w_0} .

Для проведення розрахунків за виразом (7) необхідно мати дані про дисперсію початкової вологості висушуваного матеріалу та дисперсію рівноважної вологості, яка зумовлена розсіюванням теплових та аеродинамічних полів сушарки. Проведені дослідження [11] дали змогу визначити аналітичні залежності мінливості температурних полів від мінливості аеродинамічних полів камер протягом процесу сушіння пиломатеріалів, які дають змогу за ре-

зультатами експериментально визначеного розсіювання швидкості циркуляції сушильного агента в штабелі, підрахувати дисперсію рівноважної вологості деревини $d_{W_p}^n$ на кожному етапі зміни режимних параметрів.

Розрахунки очікуваного розсіювання кінцевої вологості пиломатеріалів хвойних та листяних порід $S_{W_k}^{розр}$ було проведено з використанням режимів, за якими вони були висушені у виробничих умовах ВАТ "Видубичі". Порівняння їх з даними фактичного розсіювання кінцевої вологості $S_{W_k}^{факт}$ показало, що розрахункові криві зміни розкиду вологості пиломатеріалів в штабелі мають задовільний збіг з експериментальними даними (рис. 2).

З метою визначення впливу розкиду аеродинамічних полів сушарок на якість сушіння пиломатеріалів, були проведені розрахунки очікуваного розсіювання кінцевої вологості пиломатеріалів за умови сушіння в різних камерах, а саме, в камерах, де проводився експеримент, та в будь-яких з іншими аеродинамічними параметрами. Розрахунки проводилися для пиломатеріалів з різними, за величиною розсіювання, початковими умовами. На рис. 3 наведені криві розкиду біжучої вологості $S_{W_0}^{розр}$ за умови сушіння в камерах з різними характеристиками аеродинамічних полів – Termolegno ($v = 0.85$ м/с, $V_v = 31,6\%$) та Copcal ($v = 0.47$ м/с, $V_v = 72,1\%$), де v – швидкість циркуляції сушильного агента в штабелі пиломатеріалів; $V_v, \%$ – коефіцієнт її варіації.

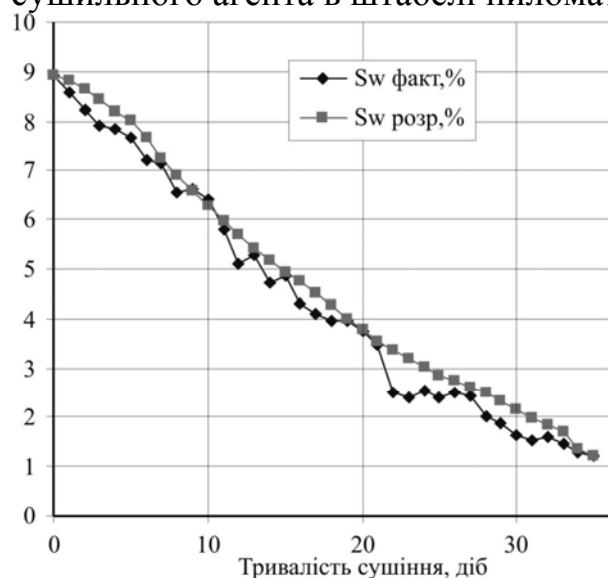


Рис. 2. Криві зміни розсіювання вологості дубових пиломатеріалів товщиною 50 мм

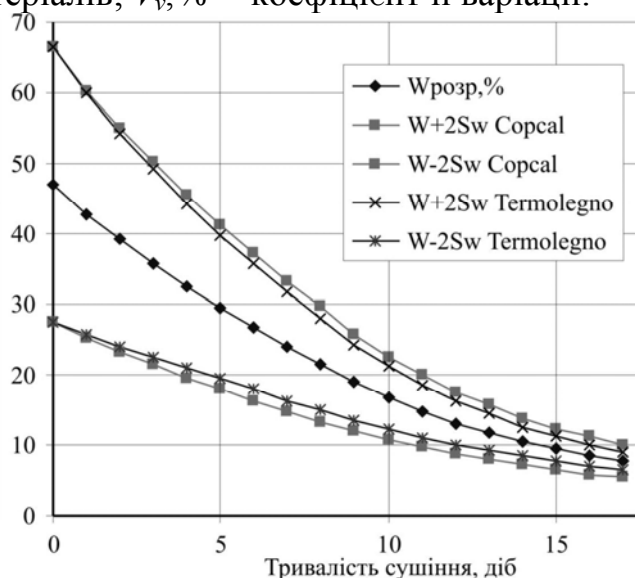


Рис. 3. Розрахункові криві розсіювання поточної вологості соснових пиломатеріалів товщиною 50 мм за умови сушіння в різних камерах

Видно, що камера Termolegno, що має вдвічі більшу рівномірність розподілення швидкості циркуляції сушильного агента в штабелі, забезпечує менше розсіювання вологості в обсязі матеріалу. Для партії пиломатеріалів, відібраних за рівнем початкової вологості, що і висушувалися режимом з відносно невеликим градієнтом сушіння, спостерігається підвищення розсіювання поточної вологості, на початку процесу, внаслідок гірших аеродинамічних характеристик сушарки. У пиломатеріалів зі значною нерівномірністю

тю початкової вологості висушуваних матеріалів вплив конструкції камери на якість сушіння є меншим.

Зменшити величину розсіювання кінцевої вологості в партії пиломатеріалів після висушування в камерах зі значною нерівномірністю аеродинамічного поля, можна шляхом вибору відповідного режиму, який забезпечить необхідну якість сушіння. Проведені розрахунки за рівнянням (7) показали, що якісно висушувати пиломатеріали всіх порід з невеликим розкидом початкової вологості, в камерах з кращими аеродинамічними показниками, дозволяє режим з будь-яким градієнтом сушіння. При цьому можна очікувати, що якість сушіння буде відповідати першій категорії якості. Отже, визначальним фактором в такому випадку буде мінімальний термін сушіння (табл. 1).

Проведені дослідження дали змогу сформулювати загальні рекомендації щодо прогнозування якості сушіння пиломатеріалів у камерах з водяним теплозабезпеченням:

- для сушарок з рівномірним розкидом швидкості циркуляції агента сушіння в штабелі пиломатеріалів – $V_v \leq 25\%$ будь-який режим забезпечує якісне сушіння за I категорією, навіть для пиломатеріалів зі значною дисперсією початкової вологості;
- для сушарок із задовільним розкидом аеродинамічного поля – $26\% \leq V_v \leq 40\%$, якісного сушіння (за II категорією якості) можна досягти шляхом пом'якшення режиму сушіння та, відповідно, збільшення тривалості процесу;
- сушарки з нерівномірним швидкісним полем $V_v > 40\%$ потребують модернізації аеродинамічної схеми.

Табл. 1. Прогнозування розкиду кінцевої вологості $\pm 2S_{W_{кін}}$ пиломатеріалів з вільхи товщиною 50 мм за умови сушіння різними режимами

Початкова вологість, $W_{поч}, \%$	Дисперсія початкової вологості, $d_{Wп}$	Режим Vanicek	Режим із постійним градієнтом $Gr=2,3$	Режим із ростучим градієнтом $Gr=2,3-3,1$	Режим із падаючим градієнтом $Gr=2,3-1,8$
Камера Termolegno					
43	26,21	$\pm 0,90$ 17*	$\pm 1,17$ 15	$\pm 1,14$ 15	$\pm 1,02$ 16
50	200,76	$\pm 1,29$ 20	$\pm 2,29$ 17	$\pm 2,67$ 16	$\pm 2,85$ 16
Камера Sorcal					
43	26,21	$\pm 2,20$ 17	$\pm 2,41$ 15	$\pm 2,18$ 15	$\pm 2,20$ 16
50	200,76	$\pm 2,32$ 20	$\pm 3,05$ 17	$\pm 3,29$ 16	$\pm 3,91$ 16

Примітка: * – термін сушіння в добах

Отже, запропонований метод розрахунку середнього квадратичного відхилення кінцевої вологості пиломатеріалів, який можна використовувати для прогнозу розкиду кінцевої вологості в партії пиломатеріалів, що висушуватимуться в камерах різних конструкцій, дає змогу дослідити як вплив нерівномірності початкових умов – розкиду початкової вологості пиломатеріалів, так і граничних умов – розкиду аеродинамічних і теплових полів лісосу-

шарок на якість сушіння пиломатеріалів і вжити відповідних заходів для отримання висушених пиломатеріалів із заданими показниками якості.

Література

1. **Руководящие** технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 143 с.
2. **Керівні технічні** матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів/ За ред. Білея П.В. – Львів: РВЦ УкрДЛТУ, 2003. – 72 с.
3. **Пінчевська О.О.** Нормалізація оцінки якості сушіння// Наук. вісник НАУ: Зб. наук. праць. – К.: НАУ. – 2006, № 103. – С. 346-352.
4. **Феллер М.Н.** Бесконечномерные эллиптические уравнения и операторы типа П. Леви// Успехи математических наук. – 1986, т.41, вып. 4(250). – С. 97-140.
5. **Феллер М.Н., Пинчевская Е.А.** О прогнозе качества сушки в конвективных лесосушилках// Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2004, № 1. – С. 54-55.
6. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Гостехиздат. – 1952. – 392 с.
7. **Темкин А.Г.** Обратные методы теплопроводности. – М.: Энергия. – 1973. – 464 с.
8. **Сажин Б.С., Гудим Л.И., Реутский В.А.** Гидромеханические и диффузионные процессы. – М.: Легпромбытиздат, 1968. – 200 с.
9. **Пинчевская Е.А.** Построение кривых кинетики сушки пиломатериалов при низкотемпературном процессе// Научные труды Грузинского государственного сельскохозяйственного университета. – Тбилиси: ГТСХУ. – 2007, XXXXI. – С. 80-84.
10. **Пинчевская Е.А.** Влияние термовлагопроводности на процесс сушки низкотемпературными режимами пиломатериалов лиственных пород// Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology. – 2007, № 62. – С. 130-135.
11. **Пінчевська О.О.** Щодо мінливості аеродинамічних та теплових полів лісосушарок// Світ меблів і деревини. – 2005, № 4. – С. 40-42.

УДК 630.37 *Проф. Є.М. Лютий, д-р техн. наук; доц. Л.О. Тисовський, канд. фіз.-мат. наук; асист. І.М. Рудько – НЛТУ України, м. Львів*

СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК КАНАТІВ СПАРЕНИХ ПІДВІСНИХ СИСТЕМ, ЗАВАНТАЖЕНИХ ВЛАСНОЮ ВАГОЮ

Запропоновано загальний підхід до моделювання та побудовано удосконалені моделі спарених підвісних установок. На цій основі розроблено метод розрахунку основних параметрів несних канатів. Визначено оптимальну довжину каната поперечної установки та розроблено рекомендації щодо розрахунку параметрів несних канатів при виконанні проектних та експлуатаційних розрахунків.

*Prof. E.M. Lutyj; Assoc. prof. L.O. Tysovskyy;
assist. I.M. Rud'ko – NUFWT of Ukraine, L'viv*

Static calculation of ropes of the coupled pendant systems loaded by the body weight

The general approach to modelling is offered and the advanced models of the coupled pendant plant are constructed. On this basis the method of calculation of key parameters of bearing ropes is developed. The optimum length of a rope of cross-section plant is certain and recommendations to performance of design and operational calculations of parameters of bearing ropes are developed.

У сучасних умовах за підвищених екологічних вимог до виробничих процесів використання підвісних транспортних систем у різних сферах економіки стає дедалі більш актуальним і фінансово обґрунтованим. Зокрема, на