

цих коридорах здійснюється трелювання деревини. Ширина коридорів, віддалі між ними залежать від конкретних умов, а також прийнятого трелювального механізму. Запропонована комбінована канатно-трелювальна система може бути успішно використана і при такій схемі розробки лісосік.

Таким чином, найбільш прийнятним трелювальним засобом деревини під час розроблення гірських лісосік, виходячи з умов збереження життєздатного підросту, є підвісні канатні установки. Але вони є досить дорогими і тому практично недоступними для малих підприємств. У цьому випадку найбільш ефективними будуть комбіновані канатно-трелювальні системи, які можуть бути успішно застосовані як у гірській, так і в рівнинній місцевостях.

Література

1. Каневский М.В., Вороницын К.И. Писаренко А.И. и др. Лесозаготовки в горных районах СССР и за рубежом. – М.: Лесн. пром-сть, 1974. – 384 с.
2. Шкіря Т. Технологія і машини лісосічних робіт. – Львів: Тріада плюс, 2003. – 352 с.
3. Тереля І.П., Кий В.В., Кий А.В. Особливості технологічного освоєння гірських лісів// Наук. вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: НЛТУУ. – 2007, вип. 17.1. – С. 123-128.
4. Горшенин Н.М. Эрозия горных лесных почв и борьба с ней. – М.: Лесн. пром-сть, 1974. – 128 с.

УДК 674.047

*Проф. П.В. Білей, д-р. техн. наук – НЛТУ України, Львів;
директор В.М. Павлюст, канд. техн. наук – ТзОВ НІВІТ*

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ТЕПЛОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИНИ

Описано і проаналізовано графоаналітичний, практичний та експериментальний методи розрахунку тривалості теплового оброблення деревини.

*Prof. P.V. Biley – NUFWT of Ukraine, L'viv;
director V.M. Pavlyust – PF "NIViT"*

The analysis of calculating methods for duration of wood warming machining

Graphoanalytical, practical and experimental calculating methods for wood warming machining are described and analyzed

Для теплового оброблення деревини застосовують такі основні способи нагрівання: кондуктивний (контактний), конвективний, радіаційний та діелектричний. Найбільш інтенсивними є кондуктивний та діелектричний. Але вони мають також і істотні недоліки. Тривалий контакт деревини з нагрітою поверхнею призводить до деструкції поверхневих шарів матеріалу. Діелектричне нагрівання є дорогим і вимагає складного устаткування. Крім того, за низької вологості деревини воно є неефективним [1].

Основне промислове значення має конвективне нагрівання деревини, яке використовують в лісопилянні, виробництві лущеного і струганого шпону, при сушінні і захисті деревини.

Процеси конвективного нагрівання деревини є дуже складними. Їхні фізичні закономірності визначаються одночасним протіканням різних тепло-масообмінних явищ. Якщо відокремити масообмінні явища, то процеси нагрівання (конвективного) характеризуються конвективною тепловіддачею (передача тепла від середовища до поверхні матеріалу) та теплопровідністю (передача тепла всередині матеріалу).

Теплове оброблення деревини проводять у вигляді пластини (дошки, заготовки, бруси) і циліндричних сортиментів при їх широкому асортименті та різних параметрах середовища. Це приводить до великого розмаїття процесів і кожен з них має свої особливості. Процеси теплового оброблення Г.С. Шубін [1] поділяє на дві великі групи:

- процеси, при яких не відбуваються фазові перетворення (випаровування, конденсація, розморожування);
- процеси, при яких відбуваються фазові перетворення.

До першої групи відносять нагрівання вологої деревини з початковою температурою t_0 вище 0°C без випаровування вологи (прогрівання деревини перед сушінням, гнуттям, теплове оброблення у виробництві шпону). До другої групи відносять прогрівання деревини при її початковій температурі нижче 0°C без зміни вологості деревини (розморожування).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Для визнання тривалості прогрівання скористаємося вихідними рівняннями (1) при початковій умові – рівномірному розподілі початкової температури деревини

$$t_{(\tau=0,x)} = t_0 = \text{const}. \quad (2)$$

Граничні умови (ГУ) при конвективному прогріванні приймають як граничні умови ГУ III роду (рівняння (3.7)) і як окремий випадок – ГУ I роду.

При ГУ I роду $\alpha \rightarrow \infty$, $t_n \approx t_c$

$$\alpha \rightarrow \infty; t_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Результат розв'язання рівняння (1) за умов (2) та (3) отримуємо у вигляді рядів Фур'є:

- температура в будь-якій точці перетину

$$\Theta_\tau = \frac{t_c - \bar{t}_x}{t_c - t_0} = \sum_{rc=1}^{\infty} A_n \cos \left[\mu_n \left(1 - \frac{x}{R} \right) \right] \exp(-\mu_n^2 F_0); \quad (4)$$

- середня по перетину температура

$$\bar{\Theta}_\tau = \frac{t_c - \bar{t}_x}{t_c - t_0} = \sum_{rc=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0). \quad (5)$$

У виразах (4) і (5) A_n , B_n – параметри рівняння, які залежать від критерію Біо, визначаються

$$Bi = \alpha R / \lambda; \quad (6)$$

μ_p – коефіцієнт характеристичного рівняння; Θ – безрозмірна температура довільної точки сортименту; x/R – безрозмірна координата; t_c – температура середовища, °C; t_0 – початкова температура деревини, °C; $\bar{t}_x$ – середня температура деревини в заданій точці, °C; F_0 – критерій Фур'є, визначаємо

$$F_0 = \frac{a\tau}{R^2}, \quad (7)$$

де: a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; τ – тривалість нагрівання, хв.; R – характерний розмір (половина товщини сортименту), м.

За рівняннями (1) та (2-5) отримаємо такі розрахункові співвідношення для визначення тривалості прогрівання:

- тривалість розморожування, с

$$\tau_p = \frac{S_1^2}{8\lambda t_c} \left[\gamma \frac{\rho_y (W - W_{ep})}{100} + \rho C_{(-)} (-t_0) \right], \quad (8)$$

де: γ – питома теплота плавлення льоду, $\gamma=335$ кДж/кг; ρ_y – умовна густина деревини, кг/м³; W_{ep} – гігроскопічна вологість при від'ємних температурах; $C_{(-)}$ – питома теплоємність деревини при мінусових температурах, кДж/(кг град);

- тривалість нагрівання після повного розморожування.

$$\tau_n = \frac{0,23S_1^2}{a} \lg \left\{ \frac{t_c}{t_c - t_x} \left[1 - \left(1 - \frac{x}{R} \right)^{1,5} \right] \right\}; \quad (9)$$

- тривалість нагрівання після повного розморожування (при $x = R$)

$$\tau_n = \frac{0,23S_1^2}{a} \lg \frac{t_c}{t_c - t_x}; \quad (10)$$

- тривалість прогрівання (після повного розморожування) до заданої середньої температури $\bar{t}$ по перетину

$$\bar{\tau}_n = \frac{0,23S_1^2}{a} \lg \frac{0,6t_c}{t_c - \bar{t}}; \quad (11)$$

- тривалість прогрівання по осі двомірної пластини ($x=R$)

$$\bar{\tau}_n = \frac{0,23S_1^2}{a_1 \left[1 + \frac{a_2}{a_1} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \right]} \lg \frac{0,66}{\Theta_0}, \quad (12)$$

де: $\Theta_0 = \Theta_1 \Theta_2$; Θ_1, Θ_2 – відповідно безрозмірна температура за товщиною та шириною матеріалу; a_1, a_2 – відповідно коефіцієнти теплопровідності за товщиною (S_1) і шириною (S_2) матеріалу.

Наведені вище розрахункові залежності придатні для розрахунків за умови постійної температури середовища $t_c = const$ та наближення $t_n \rightarrow t_c$. Обидві ці умови в реальних процесах не витримуються. Перша умова не витримується, тому що в початковий момент прогрівання матеріал потребує ве-

ликої кількості теплоти, а огороження установки – подолання теплової інерції. Друга умова в початковий момент (майже протягом всього початкового прогрівання) не витримується через інтенсивну передачу теплової енергії від поверхневих до центральних шарів деревини.

Тривалість теплового оброблення фанерної сировини та пиловника Г.С. Шубін [2] рекомендує розраховувати табличним методом за формулою

$$\tau_n = \tau_{вих} A_s A_w A_{t_0} A_n A_d A_{корн} C_Q, \quad (13)$$

де: $\tau_{вих}$ – вихідна тривалість теплового оброблення сортиментів для різної температури середовища (t_c) при $W=80\%$, $t_0 = -20^\circ C$; A_s – коефіцієнт, який враховує глибину розморожування – S ; A_w – коефіцієнт, який враховує дійсну вологість матеріалу – W ; A_{t_0} – коефіцієнт, який враховує початкову температуру – t_0 ; A_n – коефіцієнт, який враховує породу деревини (за ρ_y); A_d – коефіцієнт, який враховує діаметр (для ванчесів – S_1 та S_2); $A_{корн}$ – коефіцієнт, який враховує наявність кори (без кори $A_{корн} = 1$); C_Q – коефіцієнт, який враховує сповільнення процесу прогрівання залежно від товщини (діаметра) сортимента, фактично витраченої кількості теплоти на нагрівання та температури нагрівання.

Проведені Г.С. Шубіним дослідження дали змогу представити розрахунки тривалості початкового прогрівання пиломатеріалів аналогічно рівнянню (13) та наведеного в керівних технічних матеріалах (КТМ) камерного сушіння пиломатеріалів [3]. Детальний огляд режимів початкової тепловологообробки при сушінні пиломатеріалів наводиться в дослідженнях П.В. Білея. На його думку, всі наведені в літературних джерелах методи розрахунку тривалості теплового оброблення деревини мають ті чи інші недоліки.

Розглянемо основні практичні чи графоаналітичні методи розрахунку тривалості початкового прогрівання, в тому числі і перед сушінням пиломатеріалів, які застосовують у дослідженнях та у виробничій практиці.

Практичні методи. П.С. Серговський [4] розробив рекомендації з технології початкової тепловологообробки пиломатеріалів залежно від пори року, породи деревини, вологісного стану матеріалу і конструкції сушильної камери. Тривалість процесу прогрівання, залежно від названих вище факторів, становила 1...6 год. на кожні 2,5 см товщини матеріалу. Наприклад, для бука тривалість початкового прогрівання сягала 3 години (на кожні 2,5 см товщини) з температурою на $5^\circ C$ вище першого ступеня та відносною вологістю повітря 100 %. При цьому тривалість тепловологообробки рахують з моменту досягнення в камері режимних параметрів (t_c, φ), тобто тут виключаються теплоінерційні характеристики сушильної камери. Однак в цих режимах не передбачено початкового прогріву при вологості деревини нижче границі насичення.

На підставі експериментальних даних та виробничого досвіду рекомендують проводити початкове прогрівання на $5...8^\circ C$ вище температури першого ступеня (але не вище $100^\circ C$) в насиченому водяною парою повітрі $\varphi \approx 100\%$ при початковій вологості матеріалу $W_n \geq W_{mn}$ та при $\varphi \approx 0,9...0,95$ і

$W_n < W_{mn}$. Наприклад, для бука тривалість початкового теплового оброблення рекомендується приймати 1,5...2,0 год. на 1 см товщини при $t_0 > 0^\circ\text{C}$ та 2,0...3,0 год. на 1 см товщини при $t_0 < 0^\circ\text{C}$. Крім того, керівні технічні матеріали (КТМ) з технології камерного сушіння пиломатеріалів рекомендують користуватись табличним методом для визначення тривалості початкового теплового оброблення пиломатеріалів за формулою

$$\tau = \tau_{вих} A_T A_B A_n A_{ш}, \quad (14)$$

де $\tau_{вих}$ – вихідна тривалість початкового прогрівання, яка розрахована для соснових пиломатеріалів при $t_{np} = 80^\circ\text{C}$, $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ з нагріванням по центру сортименту до $t_d = 77^\circ\text{C}$, вологістю $W_n = 60\%$, $t_d = -20...0^\circ\text{C}$ та при ширині штабеля 1,8 м, год.; $A_T A_B A_n A_{ш}$ – коефіцієнти, які враховують початкову температуру деревини t_0 та температуру середовища $t_c(A_T)$, вологість деревини (A_B), її породу (A_n) та ширину штабеля ($A_{ш}$).

Дані рекомендації щодо проведення початкового прогрівання розповсюджуються на сушильні камери періодичної дії, які мають зволожувальні трубки та на камери безперервної дії, оснащені спеціальними відсіками для початкового теплового оброблення. Однак ці рекомендації не враховують теплової інерції камер.

Графоаналітичні методи. І.В. Кречетов [5] рекомендує визначати тривалість прогріву пиломатеріалів перед сушінням за допомогою діаграми, яка враховує кількість теплової енергії, що передається матеріалу під час нагрівання. При цьому, на думку І.В. Кречетова, тривалість початкового нагрівання потрібно відраховувати з моменту досягнення параметрів середовища в сушарці заданого режимом значення. Цю методику визначення тривалості початкового теплового оброблення при сушінні пиломатеріалів слід вважати універсальною. Однак істотним її недоліком є труднощі при визначенні кількості теплоти (фактичного значення), яка витрачається при нагріванні.

Для випадків, коли деревина, що прогривається, має початкову температуру вище 0°C , визначення тривалості прогрівання до потрібної температури в заданій точці можна здійснити за номограмами О.В. Ликова [6]. Розрахунок за допомогою цих номограм вважатиметься правильним за умови дотримання таких вимог:

- початкова температура (t_0) деревини є однаковою для всіх точок сортименту (в більшості випадків так воно і є);
- температура середовища (t_c), в якому нагрівається деревина, є постійною протягом всього процесу прогрівання (відповідає дійсності лише у другій половині тривалості початкового прогрівання та в процесі пропарювання);
- нагрівання відбувається в середовищі насиченої пари або у воді, тобто середовище забезпечує інтенсивний теплообмін з поверхнею матеріалу, коли без великої похибки можна вважати, що $\alpha \rightarrow \infty$ та $B_i \rightarrow \infty$, і, відповідно, $t_n \rightarrow t_c$ (ця умова витримується тільки у другій половині процесу початкового прогрівання та в процесі пропарювання);

- не відбувається вологообмін між матеріалом та середовищем (ця умова витримується не повністю: при тепловому обробленні відбувається також і незначний вологообмін).

Розв'язок рівняння (1) за умов (2) отримано у критеріальній формі

$$\Theta = f\left(\frac{x}{R}; F_0; B_i\right). \quad (15)$$

Як вказувалося вище, $\alpha \rightarrow \infty$, а $t_n \rightarrow t_c$, тому критерій Біо можна вивести з критеріального рівняння (15). Таким чином, розв'язок рівняння (1) при вказаних граничних і початкових умовах буде мати вигляд

$$\Theta = f\left(\frac{x}{R}; F_0\right). \quad (16)$$

Номограма, розроблена О.В. Ликовим, зв'язує три величини – x/R ; F_0 та Θ . Таким чином, за відомими значеннями Θ та x/R з критерію Фур'є знаходимо тривалість процесу нагрівання. В цій задачі відомі значення t_c, t_0, t_x, x, R , тому на номограмі О.В. Ликова в точці перетину значень Θ та x/R знаходимо величину критерію Фур'є – F_0 . А далі за формулою (7) знаходимо тривалість прогрівання, τ .

Як видно з аналізу умов розрахунку, наведених вище в дужках, цей графоаналітичний метод, який широко використовується в розрахунках під час виготовлення струганого та лущеного шпону, має істотні недоліки.

Експериментальні дослідження режимів та технології початкового теплового оброблення пиломатеріалів і заготовок твердих листяних порід, які проводили П.В. Білей, Й.В. Андрашек та В.М. Павлюст, показали, що швидкість зростання температури на поверхні і в центрі матеріалу відстає від швидкості зростання температури середовища (наприклад, для бука товщиною $S_1=32$ мм при $t_c=62^\circ\text{C}$, $\varphi=100\%$) відставання становить 2,5 год. При прогріванні матеріалу в штабелі тривалість процесу збільшується вдвічі. За розрахунковою номограмою Г.С. Шубіна, коефіцієнт сповільнення прогрівання у штабелі змінюється в діапазоні від 0 до 36. Такі зміни значення коефіцієнта сповільнення призводять до вкрай неточного визначення тривалості процесу початкової тепловологообробки [1]. Використавши діаграму для витрат теплоти на прогрівання деревини та результати експериментальних досліджень, автор отримав емпіричну залежність тривалості початкового прогрівання букових пиломатеріалів τ_{np} , год.

$$\tau_{np} = 2,95 \cdot 10^{-5} t_\delta^{0,92} S_1^2 \lg W_n, \quad (17)$$

де: t_δ – температура деревини (в центрі сортимента); $t_\delta = t_c - 3^\circ\text{C}$; t_c – температура середовища, $^\circ\text{C}$; S_1 – товщина матеріалу, мм; W_n – початкова вологість деревини, % абс.

За даною залежністю (17) побудовано номограму, яку можна використовувати в інженерних розрахунках.

Оптимізація режимів і технології пропарювання букових пиломатеріалів (заготовок) має основною своєю метою визначення тривалості операцій

цього процесу: теплової інерції (тривалості розгону) обладнання (τ_0); розморожування (τ_p); початкового прогріву (τ_{np}); пропарювання (τ_{oc}); охолодження (τ_{ox}).

Таким чином, цільову функцію оптимізації процесу пропарювання потрібно шукати з врахуванням запропонованих вище рекомендацій за такою залежністю:

$$T = f(\tau_0, \tau_p, \tau_{np}, \tau_{oc}, \tau_{ox}, t_c, t_x, t_o, S_1, S_2, W) \rightarrow \min.$$

Висновки. При тепловому обробленню деревини з вологістю вище точки насичення клітинних стінок під час теплової стерилізації букових пиломатеріалів процес відбувається без зміни в ній агрегатного стану вологи. Тобто процес тепловологообробки визначається лише двома явищами: теплообміном поверхні матеріалу з навколишнім середовищем та теплопровідністю деревини.

Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплового оброблення і сушіння деревини: Монографія. – Коломия: Вік, 2005. – 364 с.
2. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.
3. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск.: ЦНИИМОД, 1985. – 143 с.
4. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
5. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 432 с.
6. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

УДК 674.047

Ст. наук. співроб. О.О. Пінчевська, канд. техн. наук –
Національний аграрний університет, м. Київ

ПОПЕРЕДНЯ ОЦІНКА ЯКОСТІ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ З ВІЛЬХИ

Запропоновано метод розрахунку дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів у сучасних камерах за умови описання процесу сушіння стохастичною моделлю з мінливими початковими та граничними умовами. Розрахункові та експериментальні криві поточної дисперсії вологості вільхових пиломатеріалів мали задовільну збіжність, що дає змогу прогнозувати якість сушіння їх в камерах різних конструкцій.

Senior research officer O.O. Pinchevska – National agrarian university, Kyiv

Preliminary assessment of drying quality alder sawn timbers

Proposed method of calculation of the dispersion finish moisture content by description the wood drying process as probability model with the accidental initial and boundary conditions. Calculation and experimental curved lines of current dispersion moisture content of alder saw timbers has satisfactory coincidence, so this method can be used for prognosis drying quality kiln dried alder saw timbers in different chambers.

Сушіння пиломатеріалів має важливе місце в технологічному процесі виготовлення деревних виробів. Під час сушіння формується значна кількість