



З. С. Сірко¹, О. І. Дерех²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

² Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

ЗОВНІШНІЙ ТЕПЛООБМІН У ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Розглянуто особливості конвективного сушіння деревинних матеріалів (пиломатеріалів, чорнових меблевих заготовок, паркетної фризи тощо). Проведено теоретичні дослідження процесів тепломасоперенесення, внаслідок чого отримано рівняння визначення інтенсивності випаровування вологи з однієї поверхні сушіння, коефіцієнта теплообміну за різних режимів руху теплоносія (агента сушіння), а також час сушіння деревини у першому періоді (періоді постійної швидкості сушіння). Розв'язано диференціальні рівняння перенесення тепла для тривіального тіла. Рівняння перенесення тепла доповнено новим членом, який враховує від'ємне джерело теплоти внаслідок об'ємного випаровування частинки рідини (води) у пограничному шарі. Розглянуто визначення конвективного теплообміну для одномірного тіла, а також балансове рівняння теплоти, розв'язане відносно коефіцієнта конвективного теплообміну. Наведено значення співвідношень інтенсивності сушіння до інтенсивності випаровування води з відкритої поверхні для різних режимів сушіння деревини. За результатами аналізу власних досліджень, а також інших учених обґрунтовано роль термодинамічних характеристик деревини під час сушіння пиломатеріалів. Проаналізовано параметри, які впливають на тепло- і масоперенесення під час конвективного сушіння, дано відповідь на питання пришвидшення процесу відведення води з вологого матеріалу, без його гальмування.

Ключові слова: тепловологообмін; конвективне сушіння; інтенсивність сушіння; період заповільненої швидкості; поверхня вологого матеріалу; крива сушіння; потенціал сушіння; швидкість сушіння.

Вступ. Сушіння, як складний тепломасообмінний процес, базується на наукових основах вивчення теплофізичних, фізико-механічних, структурних та інших властивостей деревини, як об'єкта сушіння. Інакше кажучи, розроблення нових і вдосконалення наявних технологій і техніки сушіння визначається як інтенсивностями тепловологого обміну між теплоносієм (агентом сушіння) і поверхнею об'єкта сушіння, так і інтенсивностями тепловологоперенесення всередині нього.

Треба зауважити, що об'єкти сушіння (пиломатеріали, чорнові меблеві заготовки, паркетна фриза тощо) характеризуються високою гідрофільністю та значною мінливістю теплофізичних, фізико-механічних властивостей саме об'єктів сушіння.

Теоретичні дослідження. Сушіння вологого матеріалу – це перенесення вологи із центральних його шарів до поверхні і далі перенесення вологи з поверхні в навколишнє середовище (повітря). Під час конвективного сушіння, коли агент оброблення переміщується відносно поверхні (елементів) матеріалу, в безпосередній близькості до поверхні матеріалу утворюється так званий пограничний шар, який сильно впливає на інтенсивність процесу сушіння. Тому важливо знати характер і динаміку формування цього шару, тобто умови, які визначають характер полів швидкостей, температури і парціального тиску пари у шарі, оскільки по-

граничний шар гальмує швидкість сушіння.

Зауважимо, що інтенсивність сушіння буде максимальною, коли можливості перенесення тепла й маси у пограничному шарі відповідають можливостям переміщення вологи і тепла всередині матеріалу.

Отже, загальне розв'язання обох задач процесу сушіння має полягати в інтегруванні повної системи рівнянь перенесення тепла і вологи (маси), як у самому об'єкті сушіння, так і всередині агента, що оточує цей вологий матеріал. При цьому для границі розподілу фаз повинні бути додатково сформульовані умови поєднання полів відповідних потенціалів тепломасоперенесення.

Варто зазначити, що в одних умовах на інтенсивність сушіння деревини впливають зовнішні умови теплоти і маси, в інших – умови перенесення вологи і теплоти всередині матеріалу.

Величину конвективного питомого теплового потоку (густину теплового потоку) визначається за формулою:

$$q_{\text{конв}} = \alpha_k (t_c - t_{\text{н.м.}}) Vm / m^2, \quad (1)$$

де α_k – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Основне балансове рівняння теплообміну в процесі сушіння показує, що тепловий потік, який спрямований до висихаючого матеріалу, витрачається на випару-

Інформація про авторів:

Сірко Зиновій Степанович, канд. техн. наук, доцент, заступник директора. Email: z.sirko@ukr.net

Дерех Ольга Ігорівна, канд. с.-г. наук, асистент кафедри екології. Email: olga.ozarkiv@gmail.com

Цитування за ДСТУ: Сірко З. С., Дерех О. І. Зовнішній теплообмін у процесі конвективного сушіння пиломатеріалів. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(6). С. 117–120.

Citation APA: Sirko, Z. S., & Derekh, O. I. (2017). External Heat Exchanger in the Process of Convective Drying of Lubricates. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(6), 117–120. <https://doi.org/10.15421/40270623>

вання вологи (q_B) і нагрівання матеріалу (q_H), тобто:

$$q_{\text{ковв}} = q_B + q_H \quad (2)$$

$$\text{або} \quad \alpha_k(t_c - t_{n,m}) = r q'_m + \rho_0 C R \frac{dt}{d\tau}, \quad (3)$$

де: r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; – інтенсивність випаровування вологи з матеріалу, кг/(м²·с); C – питома теплоємність вологої деревини, Дж/(кг·°C); R – характерний розмір тіла ($R=S_l/2$; S_l – товщина), м; $dt/d\tau$ – швидкість нагрівання поверхні матеріалу, град/с.

Як відомо, в реальних тілах перенесення тепла і маси проходить в трьох напрямках. Але враховуючи те, що довжина деревинних сортиментів значно переважає їх товщину і ширину, то обмежуються тоді розглядом двовимірного тіла. Тому замість характерного (визначального) розміру (товщини) використовують певний еквівалентний розмір ($S_{екв}$). Цим самим реальні багатомірні тіла приводять до еквівалентного одномірного розміру. В інженерній практиці у розрахунках часу сушіння в ролі такого розміру використовують його два різновиди: приведений (осереднений) розмір S_{np} і гідравлічний радіус S_r , тобто:

$$S_{np} = \frac{S_1 \cdot S_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}; S_r = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2}, \quad (4)$$

де S_1, S_2 – відповідно товщина і ширина матеріалу у вигляді пластини (дошка, заготовка, брус і т.ін.).

Проте повної чіткості в рекомендаціях щодо використання їх на сьогодні немає. Хоча задачі пошуку способу визначення еквівалентного розміру вивчали П. С. Серговський, Г. С. Шубін, П. В. Білей та інші, які дають свої пропозиції, що часто мають суперечливий характер.

На нашу думку, в багатьох випадках за характерний розмір R можна взяти половину товщини висушуваного матеріалу. Зокрема, під час сушіння обрізних пиломатеріалів при вкладанні їх без шпацій у камерах із поперечною примусовою циркуляцією агента сушіння (повітря) за визначений розмір можна вважати кожний ряд штабеля і розглядати його як необмежену пластину. У цьому разі неточність у визначенні характерного розміру припадає на коефіцієнт теплообміну (останній визначається експериментально).

Для визначення характерного розміру матеріалу можна також скористатись відомим положенням теорії теплопровідності, яке вимагає, своєю чергою, розв'язання диференціального рівняння перенесення тепла для багатомірного тіла, яке буде представляти собою добуток розв'язків для необмежених одномірних тіл, кожне з яких буде мати характерний розмір, що відповідає розміру багатомірного тіла в певному напрямку.

Проте розв'язання таких диференціальних рівнянь, навіть сучасними методами математики, є здебільшого неможливим і трудомістким, а точність таких розрахунків – невеликою. Тому й розглянемо визначення конвективного теплообміну для одномірного тіла.

Інтенсивність випаровування вологи з одиниці поверхні визначимо за формулою

$$q'_m = \frac{dW/d\tau}{100} \rho_0 R = \frac{du}{d\tau} \cdot \rho_0 \cdot R \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}. \quad (5)$$

Тоді балансове рівняння теплоти, розв'язане відносно коефіцієнта конвективного теплообміну, можна записати так:

$$\alpha_k = \frac{\left(\frac{dW}{d\tau}\right) \rho_0 R \left(r + C \frac{dt}{dW} \cdot 100\right)}{100(t_c - t_{n,m})}. \quad (6)$$

Це відношення (6) є головним для визначення коефіцієнта конвективного теплообміну на будь-якому етапі процесу сушіння.

Треба зазначити, що в періоді заповільненої швидкості сушіння змінюються температура поверхні матеріалу ($t_{п.м.} = t_m$) вологого матеріалу, швидкість сушіння ($dW/d\tau$) і темпи нагрівання самого матеріалу (dt/dW або dt/dU). Це значить, що коефіцієнт конвективного теплообміну також змінюється. Для періоду постійної швидкості сушіння, коли з поверхні матеріалу випаровується вільна волога і температура поверхні є практично сталою величиною ($dt/d\tau \rightarrow 0$), то вираз (6) спрощується і набуває вигляду

$$\alpha_k = \frac{\rho_0 R r \cdot dW/d\tau}{100(t_c - t_{n,m})} = \frac{\rho_0 R r dU/d\tau}{(t_c - t_{n,m})}. \quad (7)$$

Величину коефіцієнта питомої теплоємності вологої деревини можна визначити за формулою Г. С. Шубіна (Shubin, 1971)

$$C = 1,173 [W(t + 0.10t)^{0.222 - W \cdot 10^4}] \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$$

або за формулою М. М. Кирилова (Shubin, 1971)

$$C = 1,172 \left[W \left(1 + \frac{t}{100} \right) \right]^{0.20}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}. \quad (8)$$

Аналіз власних досліджень (Sergeeva, 1961; Ozarkiv & Sokolovskiy, 1999; Bilej, Ozarkiv & Sokolovskij, 2002; Ozarkiv et al., 2008) і досліджень інших вчених, показує, що характер зміни коефіцієнта конвективного теплообміну, ускладненого масообміном, залежно від вологості матеріалу є аналогічний до закономірностей швидкості сушіння. Інакше кажучи, якщо криві швидкості сушіння мають період постійної швидкості сушіння, то криві залежності α_k ($\alpha_k = const$). У разі, коли періоду постійної швидкості немає, то і дільниці сталого коефіцієнта теплообміну також немає.

У періоді заповільненої швидкості сушіння коефіцієнт конвективного теплообміну буде зменшуватися по кривій, яка має випуклість до осі вологості (вологомісту) і значення α_k прямує до коефіцієнта теплообміну, ускладненого вологообміном ($\alpha = \alpha_c$).

Треба зазначити, що для умов конвективного сушіння матеріалів критерій Gu має дуже важливе значення, тому що враховує відносний потенціал сушіння. Проте, варто зауважити, що аналіз впливу критерію Гухмана на коефіцієнт теплообміну вказує на те, що за значень T_c , близьких до T_m (тобто, коли є початок процесу сушіння або коли $\varphi = 1,0$; $T_c \approx T_m$), критерій Gu приводить до тривіального значення $\alpha_k = 0$, що не відповідає фізичній суті, адже в останньому випадку $\alpha_k = \alpha_c$ (α_c – коефіцієнт теплообміну середовища). Інакше кажучи, коефіцієнт теплообміну, під час сушіння стає рівним коефіцієнту теплообміну, не ускладненому вологообміном, тобто $\alpha_k = \alpha_c$. Це значить, що величину коефіцієнта конвективного сушіння можна визначити за формулами М. О. Михеева (Miheev, 1956) для коефіцієнта чистого теплообміну α_c , неускладненого вологообміном, тобто:

$$Re < 10^5 \quad \alpha_c = 0,660 Re^{0.50}/l; \quad (9)$$

$$Re > 10^5 \quad \alpha_c = 0,032 Re^{0.80}/l, \quad (10)$$

де: l – визначальний розмір (довжина матеріалу в напрямку руху агента сушіння, тобто розмір впоперек во-

локон одного горизонтального ряду дощок), m ; α_c – коефіцієнт теплопровідності агента сушіння $\text{Вт/см} \cdot \text{град}$.

Окрім цього, за сталого потенціалу сушіння ($t_c - t_m$) із збільшенням температури T_c критерій Гухмана зменшується, а коефіцієнт теплообміну зростає. З цієї причини проф. Г. С. Шубін (Shubin, 1971) не встановив закономірності впливу критерію Gu на теплообмінний критерій Нусельта у процесі сушіння деревини. Тому він запропонував таку формулу:

$$Nu = 0,72 Re^{0,80} \quad (11)$$

Лебедєв П. Д. (Lebedev, 1955) після глибокого аналізу впливу температури і відносної вологості середовища для визначення теплообмінного критерію Нусельта в першому періоді конвективного сушіння різних матеріалів (зокрема деревини) запропонував формулу

$$Nu = A Re^n (T_c / T_m)^m, \quad (12)$$

в якій критерій Гухмана має спрощений вид (T_c / T_m) .

Параметричний критерій T_c / T_m визначає збільшення коефіцієнта теплообміну завдяки турбулізації повітряного потоку (агента сушіння) парою випаровуваної води з поверхні матеріалу.

Наукове пояснення введення в критеріальні рівняння тепло- і масообміну критеріїв $Gu(T_c / T_m)$ дав акад. О. В. Ликов (Lykov, 1967, 1970). Він показав, що ці критерії характеризують особливості тепло-масообміну в процесі сушіння, а також потенціальну можливість об'ємного випаровування диспергованих у теплоносії дрібних частинок рідини. Отже, рівняння перенесення тепла потрібно доповнити новим членом, який враховував би від'ємне джерело теплоти внаслідок об'ємного випаровування цих частинок рідини (води) у пограничному шарі.

Для періоду постійної швидкості конвективного сушіння деревини автор отримав рівняння:

- коли агент сушіння – перегріта пара

$$Nu = 0,0662 \cdot Re^{0,80} (T_c / T_m); \quad (13)$$

- для вологого повітря

$$Nu = 0,0575 \cdot Re^{0,80} (T_c / T_m)^2. \quad (14)$$

Варто зауважити, що показник степеня для параметричного критерію (T_c / T_m) дорівнює $m = 2$.

Якщо прийняти критерій Прандтля рівним для вологого повітря $Pr = 0,72$ і для перегрітої пари $Pr = 1,10$, то математичне оброблення дає змогу отримати узагальнене рівняння критерію Нусельта для періоду постійної швидкості сушіння

$$Nu = 0,0641 \cdot Re^{0,80} (T_c / T_m) \cdot Pr^{0,33}. \quad (15)$$

Для порівняльної оцінки інтенсивності випаровування води в періоді постійної швидкості сушіння за конвективного підведення теплоти із інтенсивності випаровування води з відкритої поверхні використовуємо результати досліджень О. В. Нестеренко, Г. Т. Сергєєва та ін. Наприклад, О. В. Нестеренко для теплообмінного критерію Нусельта при випаровуванні води з відкритої поверхні, коли $Re > 2,2 \cdot 10^4$, наводить формулу:

$$Nu_{\text{вип}} = 0,027 \cdot Re^{0,90} Pr^{0,33} Gu^{0,175} \quad (16)$$

Свою чергою, Г. Т. Сергєєв під час оброблення експериментальних даних з тепло- і масообміну при випаровуванні води із вільної поверхні в умовах вимушеного потоку, коли $2 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$ (турбулентний режим руху), отримав формули:

- для теплообміну

$$Nu = 0,086 Re^{0,80} Pr^{0,33} Gu^{0,20}; \quad (17)$$

- для вологообміну

$$Nu_m = 0,094 Re^{0,80} Pr^{0,33} Gu^{0,20}, \quad (18)$$

де $Gu = (T_c / T_m) / T_c$.

Відомо (Mysak et al., 2016), що інтенсивність випаровування води з відкритої поверхні визначають за формулою

$$q'_{\text{в.н.}} = \frac{Nu_m \cdot \lambda_c}{rl} (T_c - T_m), \quad (19)$$

а інтенсивність сушіння деревини в першому періоді описується рівнянням

$$q'_m = \frac{\alpha_n}{r} (T_c - T_m) = \frac{Nu \lambda_c}{rl} (T_c - T_m), \quad (20)$$

де: – інтенсивність випаровування води із вільної поверхні, $\text{кг}(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; r – питома теплота пароутворення (приймається за температури $T_m = t_{\text{н.м.}}$), Дж/кг ; Nu – теплообмінний критерій Нусельта у періоді постійної швидкості сушіння, що можна розраховувати за (15).

Тоді співвідношення, тобто

$$\varepsilon_q = \frac{q'_m}{q'_{\text{в.н.}}} = \frac{Nu}{Nu_{\text{в.н.}}} = 2,37 \cdot Re^{0,10} \left(\frac{T_c}{T_m} \right)^2 Gu^{-0,175}. \quad (21)$$

У таблиці наведено значення співвідношень інтенсивності сушіння до інтенсивності випаровування води з відкритої поверхні для різних режимів сушіння деревини.

Табл. Значення ε_q для різних режимів конвективного сушіння

Re	Значення ε_q , $\varepsilon_q = \frac{q'_m}{q'_{\text{в.н.}}}$ для режимів, коли t_c / t_m					
	120/100	110/100	95/80	75/60	65/60	130/100
10^5	1,39	1,49	1,60	1,41	1,60	1,37
10^6	1,10	1,18	1,26	1,12	1,36	1,09

Із таблиці видно, що інтенсивність випаровування в першому періоді сушіння деревини вища за інтенсивність випаровування води з відкритої поверхні, що можна пояснити, на нашу думку, збільшенням поверхні випаровування завдяки шорховатості деревини, тобто впливом мікро- і макронерівностей самої поверхні. Збільшення критерію Рейнольдса зумовлює зменшення відношення ε_q . Підвищення температури перегрівання t_c / t_m також призводить до зменшення $(Nu_m / Nu_{\text{в.н.}})$.

Знання критерію Нусельта, своєю чергою, в періоді постійної швидкості сушіння дає змогу розв'язати низку дуже важливих задач щодо зовнішнього і внутрішнього перенесення води, зокрема визначати швидкість конвективного сушіння в першому періоді, тобто:

$$N = \frac{100 Nu \lambda_c}{\rho_0 R l} (t_c - t_m) \quad (22)$$

або час сушіння в першому періоді

$$\tau_1 = \frac{(W_n - W_{\text{кр}}) \rho_0 \cdot R \cdot r \cdot l}{100 Nu \cdot \lambda_c \cdot (t_c - t_m)} = \frac{(U_n - U_{\text{кр}}) \rho_0 \cdot R \cdot r \cdot l}{Nu \cdot \lambda_c \cdot (t_c - t_m)}, \quad (23)$$

де λ_c – коефіцієнт теплопровідності середовища (агента сушіння).

Висновок. На основі теоретичних досліджень процесів зовнішнього тепловологообміну можна зазначити:

- роль термодинамічних характеристик деревини, як об'єкта сушіння, є істотною;
- отримані рівняння повністю розкривають особливості руху води в деревині під час конвективного сушіння.

Перелік використаних джерел

- Bilej, P. V., Ozarkiv, I. M., & Sokolovskij, I. A. (2002). Analiz metodov opredelenija potencyala vlagoprovodnosti v processe sushki drevesiny. *Tehnologija i oborudovanie derevoobrabatyvajushih proizvodstv: Mezhvuz. sbornik nauch. trudov*, (pp. 137–142). Saint Petersburg. [in Russian].
- Krisher, O. N. (1961). *Nauchnye osnovy tehniki sushki*. Moscow: MLTI. 539 p. [in Russian].
- Lebedev, P. D. (1955). *Sushka infrakrasnymi luchami*. Moscow–Leningrad: Gosjeenergoizdat. 232 p. [in Russian].
- Lykov, A. V. (1967). *Teorija teploprovodnosti*. Moscow: Vyssh. shkola. 593 p. [in Russian].
- Lykov, A. V. (1970). *Teplomassoobmen: spravocnik*. Moscow: Jenergija. 480 p. [in Russian].
- Miheev, M. A. (1956). *Osnovi teploperedachi*. Moscow: Gosjenergoizdat. 392 p. [in Russian].
- Mysak, Y.S., Ozarkiv, I. M., Kuznietsova, M. Ya., Sokolovskiy, I. A., & Kuzma, V. M. (2016). *Osnovy teplomassoobminu: navch. posibnyk*. Lviv: NVF "Ukrainski tekhnolohii". 200 p. [in Ukrainian].
- Nesterenko, A. V. (1954). Jeksperimentalnoe issledovanie teplo- i masoobmena pri isparenii zhydkosti so svobodnoj vodnoj poverhnosti. *Zhurnal tehnichekoj fiziki: Trudy MIIGS*, 24, 729–741. [in Russian].
- Ozarkiv, I. M. (2002). Opredelenie koeficijenta teploobmena v processe kombinirovannoj (termoradiacino-konvektivnoj) sushki drevesiny. *Tehnologija i oborudovanie derevoobrabatyvajushih proizvodstv: Mezhvuzov. sbornik nauch. trudov*, (pp. 142–147). Saint Petersburg: GLTA. [in Russian].
- Ozarkiv, I. M., & Sokolovskiy, I. A. (1999). Rozrakhunok temperatury poverkhni dereviny v protsesakh kombinovanoho sushinnia. *Scientific Bulletin of UNFU*, 9(13), 9–14. [in Ukrainian].
- Ozarkiv, I. M., Soroka, L. Ya., & Hryniuk, Yu. I. (1997). *Osnovy aerodynamiky i teplomassoobminu: navch. posibnyk*. Kyiv: IZMN. 280 p. [in Ukrainian].
- Ozarkiv, I. M., Bilej, P. V., Maksymiv, V. M., Sokolovskiy, I. A., Soroka, L. Ya., & Atsberher, y. L. (2008). *Teplovi protsesy derevoobrobky: navch. posibnyk*. Lviv: NLTU Ukrainy. 264 p. [in Ukrainian].
- Polonskaja, F. M. (1953). Issledovanie teplo i vlagooobmena v processe kombinirovannoj sushki. *Zhurnal tehnichekoj fiziki*, 23, 796–802. [in Russian].
- Sergeeva, G. T. (1961). Teplo- i masoobmen pri isparenii zhydkosti v vyzhdenyj potok gaza. *Nefiltrujushhiesja zhydkosti glushenija*, 2, 77–81. [in Russian].
- Sergovskij, P. S., & Rasev, A. N. (1983). *Gidrotermicheskaia obrabotka i konservirovanie drevesiny*. Moscow: Lesn. prom-st. 272 p. [in Russian].
- Shlihting, G. (1969). *Teorija pogranychogo sloja: per. s nem., pod red. L. G. Lojenskogo*. Moscow: Nauka. 742 p. [in Russian].
- Shubin, G. S. (1971). Voprosy vlagoperenosa i metodov rascheta prodolzhitel'nosti sushki drevesiny. *Sovrem. jenergosber. tepl. tehnologii: Tr. 1-j mezhdunarodnyj nauch.-prakt. konf.*, (Vol. 1, pp. 164–167). Moscow: MLTI. [in Russian].
- Shubin, G. S. (1973). *Fizicheskie osnovy i raschet processa sushki drevesiny*. Moscow: Lesn. prom-st. 248 p. [in Russian].

З. С. Сирко¹, О. И. Дерех²

¹Національний університет біоресурсів і природопольовання України, г. Київ, Україна

²Національний лісотехнічний університет України, г. Львів, Україна

ВНЕШНИЙ ТЕПЛОБМЕН В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены особенности конвективной сушки древесных материалов (пиломатериалов, черновых мебельных заготовок, паркетной фрезы и т.д.). Проведены теоретические исследования процессов тепломассопереноса, в результате чего получено уравнение для определения интенсивности испарения влаги с одной поверхности сушки, коэффициента теплообмена при различных режимах движения теплоносителя (агента сушки), а также время сушки древесины в первом периоде (периоде постоянной скорости сушки). Решены дифференциальные уравнения переноса тепла для тривиального тела. Уравнение переноса тепла дополнено новым членом, который учитывает отрицательный источник теплоты в результате объемного испарения частиц жидкости (воды) в пограничном слое. Рассмотрены определения конвективного теплообмена для одномерного тела, а также балансовое уравнение теплоты решено относительно коэффициента конвективного теплообмена. Приведены значения соотношений интенсивности сушки к интенсивности испарения воды с открытой поверхности для различных режимов сушки древесины. По результатам анализа собственных исследований, а также других ученых обоснована роль термодинамических характеристик древесины при сушке пиломатериалов. Проведен анализ параметров, влияющих на тепло- и массоперенос при конвективной сушке, дан ответ на вопрос ускорения процесса отвода воды из влажного материала, без его торможения.

Ключевые слова: теплообмен; конвективная сушка; интенсивность сушки; период угасающей скорости; поверхность влажного материала; кривая сушки; потенциал сушки; скорость сушки.

Z. S. Sirko¹, O. I. Derekh²

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

EXTERNAL HEAT EXCHANGER IN THE PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF LUBRICATES

The features of convective drying of wood materials (lumber, rough furniture preparations, parquet friezes, etc.) are considered in the work. Theoretical studies of heat transfer processes have been carried out, resulting in the equation for determining the intensity of evaporation of moisture from one surface of drying, the heat transfer coefficient under different modes of movement of the heat carrier (drying agent), as well as the drying time of the wood in the first period (the period of constant drying rate). The differential equations of transfer of heat for a trivial body are solved. The heat transfer equation is supplemented by a new member that takes into account the negative heat source as a result of volumetric evaporation of liquid particles (water) in the boundary layer. The definition of convective heat transfer for a one-dimensional body, as well as the balance equation of heat, is solved with respect to the coefficient of convective heat transfer. The values of the ratios of drying intensity to the intensity of evaporation of water from the open surface for different drying conditions are given. Due to the analysis of own research, as well as various scientists, the role of thermodynamic characteristics of wood during drying of sawn timber is substantiated. The analysis of the parameters that influence the heat and mass transfer during convective drying is carried out, the answer to the question of speeding up the process of drawing water from a wet material without its inhibition is given.

Keywords: heat-transfer; convective drying; drying rate; period of freezing speed; surface of wet material; drying curve; drying potential; drying speed.