Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU
http://nv.nltu.edu.ua
https://doi.org/10.15421/40270914
Article received 06.11.2017 p.
Article accepted 28.11.2017 p.
УДК 674.047

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

@ Correspondence author
P. V. Biley
p.biley@ukr.net

П. В. Білей, І. А. Соколовський, Р. О. Рокунь
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КОНВЕКТИВНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Відомо, що сушіння деревини є складним тепломасообмінним процесом. Зазначено, що процеси сушіння шпону, подрібненої деревини та пиломатеріалів досліджено у багатьох наукових публікаціях, навчальних посібниках, підручниках і монографіях, а конвективне сушіння профільних заготовок із масивної літератури є недостатньо вивченим, бо профільні заготовки (взуттєві колодки, профільні елементи столярно-будівельних і меблевих виробів та дров) мають змінний поперечний перетин, який змінюється також і по довжині заготовок. Розглянуто процес сушіння деревини, зокрема і профільних заготовок (дров) із масивної деревини, що складається з таких теплових технологічних операцій: початкове нагрівання, пропарювання і сушіння, а проміжкові тепловологооброблення і кондиціонування в процесах сушіння дров не враховують. Досліджено закономірності зовнішнього і внутрішнього переміщення тепла і вологи в процесах нагрівання і сушіння деревини, внаслідок чого отримано основне рівняння кінетики процесу сушіння, яке встановлює взаємозв'язок між теплообміном і вологообміном у вигляді відношення кількості витраченої теплоти на нагрівання деревини і випаровування вологи та швидкості сушіння. Використано диференційне рівняння конвективної дифузії разом з рівнянням масовіддачі стаціонарного процесу перенесення вологи за рахунок різниці концентрації дифузійної речовини (у цьому випадку – вологи) та рівнянням першого закону Фіка, що дало змогу вивести значення масообмінних критеріїв Нуссельта, Фур'є, Пекле і Прандтля. Визначено, що необхідною передумовою подібності процесів масовіддачі є дотримання аеродинамічної подібності, яку описують критеріями Рейнольда і Фруда. Синтезовано, на основі описаного вище, фізико-математичну модель процесу сушіння у вигляді залежностей між критерієм Нуссельта та критеріями Фур'є, Рейнольда та геометричної подібності. Отриманою залежністю можна описувати всі теплові технологічні операції процесу сушіння.

Ключові слова: теплообмін; масообмін; вологість; деревина; критерії подібності; профільні заготовки; дрова; нагрівання; сушіння; технологічні операції.

Вступ. Проблема нагрівання та сушіння вологих матеріалів охоплює питання перенесення тепла і маси (вологи), як усередині тіла (внутрішня задача), так і в пограничному шарі на межі розподілу фаз (зовнішня задача); тобто результатна інтенсивність сушіння залежить від умов перенесення тепла і маси як в середині тіла, так і на межі поділу фаз (тіло – навколишнє середовище). Інтенсивність сушіння максимальна, коли можливості перенесення тепла і маси в пограничному шарі відповідають можливостям переміщення вологи і тепла всередині матеріалу (Bilei, 2005; Bilei et al., 2013; Labai, 1998).

Отже, загальне вирішення завдань процесів нагрівання і сушіння повинне полягати в інтегруванні певної системи рівнянь перенесення тепла і маси як у самому матеріалі, так і в середовищі, яке оточує вологий матеріал. Для цього для межі розподілу фаз повинні бути сформульовані умови поєднання полів відповідних потенціалів. З огляду на те, що досі таке вирішення не отримане, то предметом теорій нагрівання та сушіння є окреме виявлення закономірностей внутрішньої тепло- і масопровідності та зовнішнього тепло- і масообміну. В одних випадках на інтенсивність сушіння деревини впливають зовнішні умови перенесення теплоти і маси (сушіння шпону і подрібненої деревини), в інших – перенесення вологи і теплоти всередині матеріалу (малий коефіцієнт вологопровідності, товстий пиломатеріал і дрова) (Bilei, 2005; Bilei et al., 2013; Labai, 1998).

Виклад основного матеріалу дослідження. Сушіння профільних заготовок із масивної деревини ускладнено низкою факторів. По-перше, змінними розмірами в поперечному перетині і по довжині, що ускладнює формування штабелів та вибір режимів сушіння. У технології промислового сушіння для кожної товщини матеріалу застосовують відповідні режими. Як показала виробнича практика у процесі сушіння дров їх поверхневі шари швидко висихають, унаслідок чого там звужуються судини (макро- і мікрокапіляри) і зменшується вологопровідність. Тому в технологічному процесі сушіння профільних заготовок і дров потрібно передбачити процеси початкового нагрівання і пропарювання у насиченому парою середовищі. Процес пропарювання сприяє виділенню із судин екстрактивних речовин і тим самим збільшує вологопровідність деревини.

Інформація про авторів:

Білей Петро Васильович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технологій сушіння та захисту деревини. **Email:** p.biley@uk.net

Соколовський Ігор Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності. **Email:** igorsokolov@ukr.net

Рокунь Роман Олександрович, здобувач кафедри технологій сушіння та захисту деревини. **Email:** R525@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Білей П. В., Соколовський І. А., Рокунь Р. О. Ідентифікація конвективного процесу сушіння деревини. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(9). С. 64–67.

Citation APA: Biley, P. V., Sokolovsky, I. A., & Rokun, R. O. (2017). Identification of the Convective Process of Wood Drying. *Scientific Bulletin of UNFU, 27*(9), 64–67. https://doi.org/10.15421/40270914

Спочатку розглянемо закономірності зовнішнього тепло- і вологообміну між висушуваним матеріалом і агентом сушіння, які є одним із визначальних факторів процесу. Кількісні характеристики цих явищ – коефіцієнти сушіння, теплообміну і вологообміну – необхідні для аналізу і розрахунку самого процесу. Вони входять у формули для розрахунку тривалості процесу сушіння, в рівняння теплового балансу і балансу вологи. Потрібні також дані для характеристики об'єкта сушіння, для автоматичного регулювання процесу і досягнення певних якісних показників висушеного матеріалу.

У техніці сушіння для визначення закономірностей тепло- і масообміну часто використовують рівняння чистого теплообміну, не ускладненого масообміном, вносячи в ці рівняння відповідні поправки. Проте у процесах сушіння теплообмін істотно відрізняється від процесу чистого теплообміну (Bilei et al., 2013).

Кількість тепла, що витрачається на нагрівання деревини, можна визначити за формулою

$$Q_н = \left(C_0 m_0 + C_в m_в\right)\frac{dt}{d\tau}, \qquad (1)$$

де: C_0, $C_в$ – відповідно питома теплоємність деревини в абсолютно сухому стані та питома теплоємність води, (кДж/(кг ˚С)); m_0, $m_в$ – відповідно маса деревини в абсолютно сухому стані та маса води, кг; $dt/d\tau$ – зміна температури деревини за певний час, ˚С/с.

Кількість тепла, що витрачається на випаровування вологи з матеріалу, можна визначити за формулою

$$Q_{вип} = r\frac{dm_в}{d\tau} = r_0 m\frac{d\overline{U}}{d\tau}, \qquad (2)$$

де r – сума питомої теплоти пароутворення і теплоти змочування, тобто $r=r_0+r_{зм}$, кДж/кг.

Із врахуванням виразів (1) та (2) і того, що середній потік тепла, підведеного до поверхні за одиницю часу, дорівнює $q_p \cdot F$, та величину (Rv) отримаємо

$$\overline{Q} = \left(C_0 + C_в \cdot \overline{U}\right)\rho_0 Rv\frac{d\bar{t}}{d\tau} + \rho_0 Rv\frac{d\overline{U}}{d\tau}\cdot r_0, \qquad (3)$$

де: $C_0+C_в \cdot U=C$ – теплоємність вологого матеріалу, (кДж/(кг ˚С)); Rv – відношення об'єму сухого матеріалу до поверхні вологого матеріалу, м.

В остаточному варіанті отримаємо

$$Q = \rho_0 R_v r\frac{d\overline{U}}{d\tau}\left(1 + \frac{C}{r_0}\frac{d\bar{t}}{d\overline{U}}\right), \qquad (4)$$

де: $\overline{C}d\bar{t}$ – кількість тепла, яке витрачено на нагрівання деревини, кДж/кг; $r_0 d\overline{U}$ – кількість тепла, яке витрачено на випаровування вологи з матеріалу, кДж/кг.

Рівняння (4) називають основним рівнянням кінетики сушіння, яке встановлює взаємозв'язок між теплообміном і вологообміном. Воно є універсальним, тобто його можна використовувати для будь-якого способу сушіння та будь-якого матеріалу і записати у такій формі:

$$\frac{dU}{d\tau} = Q / \rho_0 R_v r\left(1 + \frac{C}{r_0}\frac{d\bar{t}}{d\overline{U}}\right). \qquad (4')$$

Визначення коефіцієнтів масовіддачі можливе інтегруванням рівняння дифузії в рухомому середовищі спільно з рівнянням руху Нав'є – Стокса і рівнянням нерозривності потоку для певних умов однозначності. Однак система вказаних рівнянь практично не має загального розв'язку. Не розв'язуючи систему основних рівнянь, методами теорії подібності можна знайти зв'язок між змінними, які характеризують процес перенесення маси у вигляді критеріального рівняння масовіддачі. Це рівняння має критерії подібності, які описують подібність процесів масовіддачі на границі фази (подібність граничних умов) і в основній масі (ядрі) фази.

Подібність граничних умов можна встановити, припускаючи наявність граничного шару, в якому перенесення маси здійснюється тільки молекулярною дифузією. Кількість речовини, яка переходить з ядра до границі фази, відповідно до рівняння масовіддачі стаціонарного процесу становить

$$M = \beta_c \cdot F \cdot (C_{пов} - C_c),\ кг/(м^2 \cdot с), \qquad (5)$$

де: $(C_{пов} - C_c)$ – різниця концентрації дифузійної речовини на масовіддаючій поверхні ($C_{пов}$) у стані рівноваги та концентрації в основній масі (ядрі) навколишнього середовища (C_c); F – масовіддаюча поверхня; β_c – коефіцієнт масовіддачі.

Ця ж кількість речовини переноситься і через пригранічний шар молекулярною дифузією. Тоді, згідно з першим законом Фіка (за $\tau = 1$), маємо

$$M = -D \cdot F\frac{\partial C}{\partial n}. \qquad (6)$$

Прирівнявши ліві і праві частини рівняння (5) і (6), отримаємо

$$\beta_c \cdot F \cdot (C_{пов} - C_c) = -D \cdot F\frac{\partial C}{\partial n}. \qquad (7)$$

Позначивши $(C_{пов} - C_c)=\Delta C_f$, та замінюючи в рівнянні ∂C на ΔC_f, а ∂n на L, та опустивши знак "мінус", отримаємо для подібних систем

$$\frac{\beta_c L}{D} = idem.$$

Цей комплекс величин є безрозмірним; його називають дифузійним критерієм Нуссельта

$$Nu \to Nu_m = \frac{\beta_c L}{D}. \qquad (8)$$

У схожих точках подібних систем критерії Нуссельта однакові $Nu_m = idem$ виражає подібність перенесення речовини на границі фази цих систем.

Для розгляду подібності процесів перенесення в ядрі фази використовуємо диференційне рівняння конвективної дифузії, для одномірного потоку маси в напрямку осі X, перпендикулярно до поверхні контакту фаз

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \omega_x\frac{\partial C}{\partial x} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \qquad (9)$$

де: $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ – зміна концентрації в часі, тобто неусталений характер процесу; $\omega_x\frac{\partial C}{\partial \tau}$ – розподіл концентрації, зумовлений конвективним перенесенням; $D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ – розподіл концентрації за рахунок молекулярної дифузії.

Замінимо члени рівняння (9) такими величинами:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} \to \frac{C}{\tau}; \omega_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \to \omega_x \cdot \frac{C}{x}; D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \to D \cdot \frac{C}{L^2},$$

тоді отримаємо безрозмірний комплекс величин

$$Fo = \frac{\tau \cdot D}{L^2}, \qquad (10)$$

який має назву дифузійного критерію Фур'є.

Рівність критеріїв Fo у відповідних точках систем – необхідна умова нестаціонарних процесів масовіддачі. Ця рівність характеризує сталість відношення зміни концентрації в часі до зміни концентрації, внаслідок чисто молекулярного процесу перенесення. Дифузійний

критерій Фур'є є аналогом теплообмінного критерію Фур'є. У критерії *Fo* величина *D* є аналогом коефіцієнта температуропровідності – *a*.

Необхідною передумовою подібності процесів масовіддачі є дотримання гідродинамічної подібності, яка вимагає, щоб у точках подібних потоків були однакові не тільки критерії Рейнольда, але і критерій Фруда. Але, якщо швидкість руху середовища є більшою за 0,5 м/с, то гравітаційна складова критерію Фруда вже не відіграє істотної ролі і тому критерій Фруда можна вилучити із подальшого розгляду (Bilei et al., 2013; Labai, 1998).

За подібності процесів перенесення маси повинна дотримуватися також геометрична подібність, яка виражається рівністю симплексів $\Gamma_1, \Gamma_2, \ldots \Gamma_n$, що є відношенням характерних геометричних розмірів до деякого значення розміру, взятого за базовий.

Як правило, визначальною величиною в розрахунках масовіддачі є коефіцієнт масовіддачі β, значення якого знаходять з критерію *Nu*. Відповідно цей критерій можна вважати визначальним.

Загальна функціональна залежність критерію Нуссельта від визначальних критеріїв і симплексів подібності для нестаціонарних процесів масовіддачі може бути виражена як

$$Nu = f(Fo, \mathrm{Re}, \Gamma_1, \Gamma_2, \ldots) \qquad (11)$$

або

$$\frac{\beta_c R}{a_m} \cdot A \left(\frac{a_m \tau}{R^2} \right)^n \left(\frac{\omega \cdot R}{\upsilon} \right)^m \left(\frac{x}{R} \right), \qquad (12)$$

де: R – характерний розмір, м; x – віддаль від поверхні матеріалу до заданої точки перетину, м; A – коефіцієнт пропорційності; n, m – показники степені.

Рівняння (12) є фізико-математичною моделлю процесу сушіння деревини з будь-яких порід деревини та розмірів матеріалу, за допомогою якого можна ідентифікувати конвективний процес сушіння будь-якого матеріалу із масивної деревини будь-яких порід (Bilei et al., 2013).

Висновки. Виведені рівняння (1)-(4) описують процеси початкового нагрівання і пропарювання деревини. У процесі пропарювання деревини відбуваються своєрідні масообмінні процеси – з деревини виділяються екстрактивні речовини, які заповнюють мікро- і макрокапіляри будови деревини. Виділення екстрактивних речовин дає змогу значно інтенсифікувати подальший процес сушіння, тому ідентифікаційна модель процесу нагрівання і пропарювання деревини тісно пов'язані з процесами масопровідності, що видно з рівняння (4).

Розв'язавши рівняння (9), знайдено величини масообмінних критеріїв Фур'є та Пекле, що разом з критерієм Рейнольда дало змогу синтезувати фізико-математичну модель, яка ідентифікує процес сушіння деревини. Рівняння (12) охоплює всі фізичні величини і масообмінні характеристики процесу сушіння будь-яких матеріалів, зокрема і дров.

Перелік використаних джерел

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

Bilei, P. V., Petryshak, I. V., Sokolovskyi, I. A., & Soroka, L. Ya. (2013). *Teplomasoobminni protsesy derevoobroblennia*. Lviv: ZUKTs. 376 p. [in Ukrainian].

Labai, V. Y. (1998). *Teplomasoobmin*. Lviv: Triada Plius. 260 p. [in Ukrainian].

П. В. Белей, И. А. Соколовский, Р. А. Рокунь

Национальный лесотехнический университет Украины, г. Львов, Украина

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Известно, что сушка древесины является сложным тепломассообменным процессом. Отмечено, что процессы сушки шпона, измельченной древесины и пиломатериалов исследованы во многих научных публикациях, учебных пособиях, учебниках и монографиях, а конвективная сушка профильных заготовок из массивной древесины недостаточно исследована, потому что профильные заготовки (обувные колодки, профильные элементы столярно-строительных и мебельных изделий и дров) имеют переменное поперечное сечение, которое меняется также и по длине заготовок. Рассмотрен процесс сушки древесины, в том числе и профильных заготовок (дров) из массивной древесины, состоящих из таких тепловых технологических операций: начального нагрева, пропарки и сушки, а промежуточные тепловлагообработки и кондиционирование в процессах сушки дров не учитывают. Исследованы закономерности внешнего и внутреннего перемещения тепла и влаги в процессах нагрева и сушки древесины в результате чего получено основное уравнение кинетики процесса сушки, которое устанавливает взаимосвязь между теплообменом и влагообменом в виде отношения количества затраченного тепла на нагрев древесины и испарения влаги и скорости сушки. Использовано дифференциальное уравнение конвективной диффузии вместе с уравнением массоотдачи стационарного процесса переноса влаги за счет разницы концентрации диффузионного вещества (в данном случае – воды) и уравнением первого закона Фика, что позволило вывести значение массообменных критериев Нуссельта, Фурье, Пекле и Прандтля. Определено, что необходимым условием сходства процессов массоотдачи является соблюдение аэродинамического сходства, которую описывают критериям Рейнольда и Фруда. Синтезирована, на основе описанного выше, физико-математическая модель процесса сушки в виде зависимостей между критерием Нуссельта и критериям Фурье, Рейнольда и геометрического подобия. Полученной зависимостью можно описывать все тепловые технологические операции процесса сушки.

Ключевые слова: теплообмен; массообмен; влажность; древесина; критерии подобия; профильные заготовки; дрова; нагрев; сушка; технологические операции.

P. V. Biley, I. A. Sokolovsky, R. O. Rokun

National Forestry University of Ukraine, Lviv, Ukraine

IDENTIFICATION OF THE CONVECTIVE PROCESS OF WOOD DRYING

Wood drying is known to be a complicated heat and mass transfer process. Although many scientific publications, textbooks, manuals and monographs are devoted to many processes of drying veneer, chopped wood and lumber, convective drying of profile workpieces is not sufficiently investigated yet in literature sources, because profile workpieces such as shoe pads, profile elements of joiner's and furniture and furniture products and firewood have an alternating cross-section, which also varies along the length of the workpieces. Therefore, the process of wood drying, including profile billets (wood) from massive wood is considered. It consists of

such thermal technological operations as initial heating, steaming and drying, and intermediate heat-treatment and conditioning in the process of drying of firewood are not considered. The regularities of the external and internal movement of heat and moisture in the processes of heating and drying of wood are studied. As a result, the basic equation of the kinetics of the drying process is defined to establishe the relationship between heat exchange and moisture exchange in the form of the ratio of the amount of heat consumed to heating the wood and the evaporation of moisture and the drying rate. The differential equation of convective diffusion together with the equation of mass transfer of the stationary process of moisture transfer due to the difference in the concentration of the diffusion substance (in this case, the moisture) and the equation of the first Fick law, which allowed deriving the values of the mass transfer criteria of Nusselt, Fourier, Peckel and Prandtl, were used. The authors have also determined that the necessary prerequisite for the similarity of the processes of mass deducing is the observance of aerodynamic similarity, which is described by the Reynold and Froude criteria. Finally, we have synthesized on the basis of the above-described physical-mathematical model of the drying process in the form of dependencies between the Nusselt criterion and the Fourier, Reynold and geometric similarity criteria. The obtained dependence can be described by all thermal process operations of the drying process.

Keywords: heat exchange; mass exchange; humidity; wood; similarity criteria; profile workpieces; firewood; heating; drying; technological operations.