

**Висновок.** Вивчено динаміку приросту біомаси мікрободоростей та їх біометанізації. Визначено основні кінетичні константи біологічної трансформації перетворення вуглекислого газу, що дає змогу розраховувати обладнання під час реалізації процесів у промислових умовах.

1. *Экология микроорганизмов: учеб. для студ. вузов / А.И. Непрусов, Е.А. Бонч-Осмоловская, В.М. Горленко и др.; под ред. А.И. Непрусова. – М.: Изд. центр “Академия”, 2004.– 272 с.* 2. Сухарев С.М., Чундак С.Ю., Сухарева О.Ю. *Техноэкология та охорона навколишнього середовища. – Львів: Новий світ-2000, 2004. – 254 с.* 3. Davey M.E., O’Toole G.A. *Microbial Biofilms: from Ecology to Molecular Genetics // Microbiology and molecular biology reviews. – 2000 – V. 64, № 4. – P. 847–867.* 4. Tenner E.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. *Практикум по микробиологии. – М.: Дрофа, 2004. – 256 с.* 5. <http://ubr.ua/uk/tv/technologii/htar-vodorostiah-poglina>. 6. Запольський А. К., Салюк А. І. *Основи екології. – К.: Вища шк., 2001.– 358 с.* 7. Берлянд М.Е. *Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.* 8. [http://24tv.ua/news/newsVideo.dovodorosti\\_mozhut\\_vryativati\\_zemlyu\\_vid\\_globalnogo\\_poteplinnya&objectId=61.9ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1199e/i1199e0.pdf](http://24tv.ua/news/newsVideo.dovodorosti_mozhut_vryativati_zemlyu_vid_globalnogo_poteplinnya&objectId=61.9ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1199e/i1199e0.pdf). 10. Родионов А. И., Кузнецов Ю. П., Соловьев Г.С. *Защита биосферы от промышленных выбросов. – М.: Химия; Колос, 2005. – 392 с.* 11. Ризниченко Н.Ф., Рубин А.Б. *Математические модели биологических продукционных процессов. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 300 с.*

УДК 66.047

Д.П. Кіндзера, В.М. Атаманюк, Б.М. Микичак, О.В. Уткіна  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра хімічної інженерії

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛО-МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СТРУГАНОВОГО БЕРЕЗОВОГО ШПОНУ

© Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Микичак Б.М., Уткіна О.В., 2014

Запропоновано процес фільтраційного сушіння березового шпону у пакеті. Експериментально визначені коефіцієнти тепло- та масопередачі залежно від швидкості руху теплового агента представлені у формі критеріальних рівнянь. Визначений коефіцієнт внутрішньої дифузії вологи із листів шпону та встановлена його залежність від температури.

**Ключові слова:** березовий шпон, тепломасообмін, фільтраційне сушіння, коефіцієнт внутрішньої дифузії.

**A process of filtration drying of packed birch veneer is proposed. Experimentally determined heat-and-mass transfer coefficients depending on the speed of the thermal agent and presented in the form of criterial equations. Coefficient of internal diffusion of moisture from veneer sheets is determined and set its dependence on temperature.**

**Key words:** birch veneer, heat and mass transfer, filtration drying, coefficient of internal diffusion of moisture.

**Вступ.** Шпон застосовується, як личкувальний матеріал, він є напівфабрикатом для виготовлення фанери та деревиннопошарових матеріалів. У процесі виготовлення шпону виникає необхідність висушування останнього від вологовмісту 40...120 % до 6...12 %, тому стадія характеризується значними затратами енергії [1, 2]. У промисловості для сушіння шпону

використовують морально і фізично застаріле обладнання, яке характеризується низькою ефективністю і відповідно перевитратами теплової енергії та високою собівартістю готової продукції. Отже, в зв'язку з недосконалістю технологічного обладнання та низькою ефективністю використання теплової енергії необхідними є дослідження альтернативних методів сушіння шпону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тепло- та масообмін між тепловим агентом і листами шпону є одним з важливих чинників процесу сушіння. На основі проведеного аналізу робіт щодо тепломасообміну процесів сушіння деревини та деревинних матеріалів відзначено, що виникає проблема під час моделювання останніх. Автори [3, 4] для прогнозування процесів теплообміну і сушіння деревини використовують розрахункові залежності, до яких входять коефіцієнти тепловіддачі, однак критеріальних залежностей, згідно з якими можна було б визначити ці коефіцієнти, не наводять. Аналіз робіт [5–9] дав змогу зробити висновок, що запропоновані математичні моделі через велику кількість припущень недостатньо точно описують процеси тепломасообміну процесів сушіння, тому для створення адекватної математичної моделі сушіння необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження, максимально наближені до промислових умов з мінімальною кількістю наближень та припущень. Проведений аналіз робіт [1, 10] щодо реалізації процесу зневоднення шпону у промислових сушарках показав, що в процесі сушіння тепловий агент біля поверхні шпону доволі швидко насичується вологою, і через це випаровування останньої зі шпону фактично припиняється.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення безперервності процесу зневоднення шпону тепловий агент біля поверхні матеріалу повинен здійснювати постійну циркуляцію. Циркуляцію теплового агента біля поверхні шпону забезпечує запропоноване фільтраційне сушіння шпону у пакеті, яке полягає у профільтовуванні теплового агента між листами шпону [11, 12]. Формування пакетів з листів шпону забезпечує вільне висихання останніх під час профільтовування теплового агента крізь канали між листами, а також фіксування їх форми для запобігання жолобленню та розривам. На основі проведених експериментальних досліджень та узагальнення результатів [10] встановлено, що втрати тиску у пакеті шпону залежать від товщини листів та відстані між ними і не перевищують 30 кПа за фіктивної швидкості фільтрування теплового агента  $w_0 = 0,1 + 0,45 \frac{M}{c}$ , а незначний гідравлічний опір рухові теплового агента підтверджує доцільність застосування запропонованого методу. Інтенсивність процесу тепломасообміну між тепловим агентом і вологими листами шпону визначає тривалість процесу фільтраційного сушіння шпону у пакеті та енергозатрати на його реалізацію, тому для моделювання процесів теплообміну зневоднення шпону важливим є визначення коефіцієнтів тепловіддачі між тепловим агентом і листовим матеріалом. Явища перенесення вологи визначаються як закономірностями зовнішньодифузійного, так і закономірностями внутрішньодифузійного процесів. До того ж розрахункових залежностей, які б дали змогу обґрунтовано визначити раціональні режими сушіння шпону фільтраційним методом у пакеті і які б забезпечували максимальне використання сушильного потенціалу теплового агента, немає.

**Мета та завдання досліджень.** Теоретично та експериментально дослідити особливості зовнішнього тепломасообміну під час фільтраційного сушіння шпону у пакеті та закономірності внутрішньодифузійного перенесення вологи з середини листів до поверхні матеріалу.

**Результати досліджень.** Об'єктом досліджень виступали листи лущеного березового шпону завтовшки 1,5 мм, початкова середня вологість яких становила 58 % і була зумовлена наявністю у шпоні вільної (капілярної) вологи, яка містилася у порожнинах клітин та міжклітинних проміжках, та зв'язаної вологи, яка знаходилася у клітинах.

Експериментальні дослідження тепломасообміну фільтраційного сушіння шпону у пакеті проводили на експериментальній установці та згідно з розробленими методиками [13]. Висота листа шпону – 30 мм (у напрямку руху теплового агента) була вибрана з метою забезпечення участі усієї поверхні листа у тепло- і масообміні, а також постійності температура теплового агента вздовж усієї поверхні листа. Пакет шпону формували із листів лущеного березового шпону

розміром  $100 \times 30 \times 1,5$  мм. Розмір пакета, утвореного із листів шпону зі склотекстолітовими пластинами завтовшки 0,8 мм між останніми, становив  $100 \times 100 \times 30$  мм.

Зважаючи на зональний характер фільтраційного сушіння, фронт теплоти масообміну у пакеті шпону переміщається у напрямку руху теплового агента, який через деякий проміжок часу починає контактувати одночасно як з вологим, так і із сухим матеріалом (зверху пакета). Теплота від теплового агента до поверхні листів шпону передається конвективно, а до його внутрішніх шарів за рахунок теплопровідності, яка, зважаючи на пористість березової деревини, є незначною (від 0,1 до 0,4 Вт/м·К).

Тому виникає необхідність вивчення процесів зовнішнього теплообміну теплового агента із сухим листовим матеріалом для розрахунку кількості теплоти, яку акумулює суха частина листа від теплового агента та зовнішнього тепломасообміну під час сушіння пакета вологого шпону. Вивчення цих процесів дає змогу інтенсифікувати процес фільтраційного сушіння шпону у пакеті внаслідок застосування оптимальних параметрів теплового агента.

Для дослідження зовнішнього теплообміну між тепловим агентом і поверхнею сухих листів пакет шпону висушений до постійної маси у сушильній шафі встановлювали на сушильну установку у контейнер, виготовлений із теплоізоляційного матеріалу (склотекстоліту). На відстані 20 мм над і під пакетом шпону встановлювали термопари для вимірювання температури теплового агента. Шість термопар під пакетом шпону встановлювалися у різних точках по відношенню до стінок контейнера і температуру теплового агента визначали як середньоарифметичне значення шести показів. Температура на виході із пакета шпону записувалась в автоматичному режимі за допомогою восьмиканального вимірювача температури РТ8-1000 з виводом інформації на персональний комп'ютер у файл даних. Над пакетом шпону температура підтримувалась постійною –  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  – за допомогою терморегулятора РТ-100 і ХК термопари з точністю до  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для узагальнення експериментальних даних процесу зовнішнього теплообміну використовували теорію подібності і отримали критеріальне рівняння такого вигляду:

$$\text{Nu}_e = 0,055 \cdot \text{Re}_e^{0,84} \cdot \text{Pr}^{0,33} . \quad (1)$$

Критеріальне рівняння (1) дає змогу визначити значення числа Нуссельта (відповідно і розрахувати коефіцієнти тепловіддачі від теплового агента до листа шпону) з точністю до  $\pm 7,2\%$  у межах зміни числа Рейнольдса  $600 \leq \text{Re}_e \leq 2000$ .

Для дослідження тепломасообміну під час фільтраційного сушіння вологих листів шпону у пакеті з вологих листів луценого березового шпону формували пакет аналогічних розмірів. Сушіння проводили протягом 20 с за температури теплового агента 50, 70 і  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а час зважування не перевищував 10 с. Щоб виключити випаровування під час зважування пакета, його закривали кришкою із теплоізоляційного матеріалу. Кожний експеримент проводили не менше ніж три рази для отримання достовірних значень.

У результаті узагальнення дослідних даних тепло- й масообміну у процесі фільтраційного сушіння луценого березового шпону у пакеті отримали відповідно такі залежності:

$$\text{Nu}_e = 0,85 \cdot \text{Re}_e^{0,4} \cdot \text{Pr}^{0,33}; \quad (2)$$

$$\text{Sh}_e = 0,85 \cdot \text{Re}_e^{0,4} \cdot \text{Sc}^{0,33}. \quad (3)$$

Максимальна відносна похибка між експериментальними даними і розрахованими за рівняннями (2) і (3) не перевищує  $\pm 9,2\%$  у межах зміни числа Рейнольдса  $600 \leq \text{Re}_e \leq 2000$ .

Після видалення вологи з поверхні листів шпону настає період, швидкість якого визначається підведенням вологи з середини матеріалу. Внутрішньодифузійні процеси є значно тривалішими у часі порівняно із зовнішньодифузійними, і для аналізу останніх необхідним є визначення коефіцієнта дифузії вологи до поверхні матеріалу. Нагрівання листів шпону у пакеті

відбувається рівномірно з обох боків і розподіл вологовмісту і температури по товщині листа шпону має симетрично параболічний характер (рис. 1).

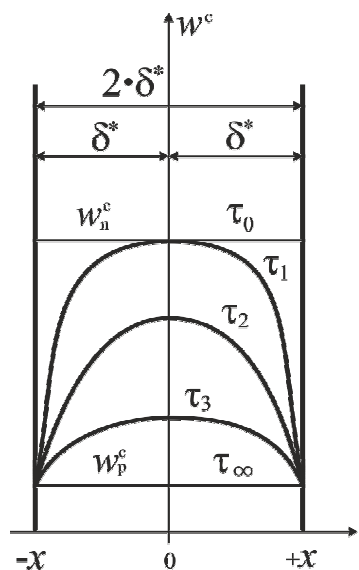


Рис. 1. Схема розподілу вологовмісту по товщині листа шпону

Коефіцієнт внутрішньої дифузії  $D_w^*$  визначали на основі закону Фіка [14] для пластини необмежених розмірів. Допускали, що числа Біо ( $Bi_0$ ) є великими [13] з подальшою перевіркою їхнього значення, а саму задачу зводили до граничних умов першого роду. Для визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії експериментальні дані представляли у вигляді графічної залежності  $\ln\left(\frac{w^c - w_p^c}{w_{kp}^c - w_p^c}\right)$  від часу сушіння  $\tau$ , а коефіцієнт дифузії визначали за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис. Визначені коефіцієнти внутрішньої дифузії води наведено у таблиці.

#### Залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії води $D_w$ від температури

T, K	323	353	373	393
$D_w^* \cdot 10^9$	0,96	1,91	2,66	3,37

Очевидно, що температурний чинник має найзначніший вплив на коефіцієнт внутрішньої дифузії  $D_w$ , що бачимо з графічної залежності  $D_w^* = f(T)$  (рис. 2).

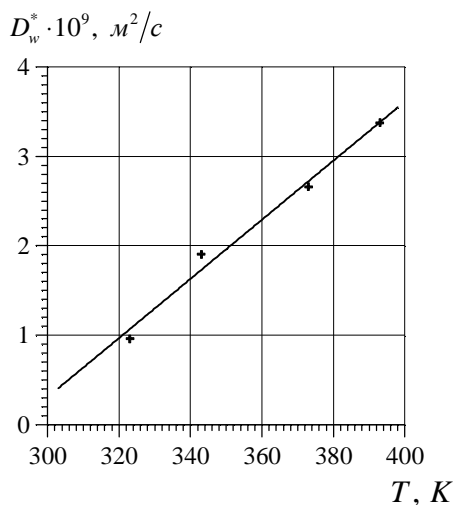


Рис. 2. Залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії  $D_w^*$  від температури для листів луценого березового шпону  $T$

Апроксимація експериментальних даних лінійною функцією дала змогу отримати таку розрахункову залежність:

$$D_w^t = D_w^{293} + 33 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293). \quad (4)$$

**Висновки.** Отримані розрахункові залежності у вигляді критеріальних рівнянь (1), (2) і (3) дають змогу визначити з необхідною для проектних розрахунків точністю коефіцієнти тепловіддачі і масовіддачі у процесі фільтраційного сушіння шпону у пакеті у першому періоді, і відповідно дають змогу прогнозувати необхідні витрати теплової енергії на процес сушіння на етапі проектування нового обладнання. Одержану залежність (4) можна використовувати для розрахунку внутрішнього вологоперенесення, а також для розрахунку часу фільтраційного сушіння листів шпону у пакеті у другому періоді.

1. Бехта П.А. *Виробництво шпону*. – К.: Основа, 2003. – 256 с. 2. Білей П.В., Петришак І.В., Соколовський І.А. *Ефективність використання теплової енергії під час виготовлення шпону і фанери* // Науковий вісник НЛТУ України. – 2008. – Вип. 18.9. – С. 118–121. 3. Озарків І.М. *Кінетика і динаміка процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів* / І.М. Озарків, І.А. Соколовський, О.І. Озарків, В.С. Козар // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2012. – Вип. 22.1. – С. 343–346. 4. Расев А.И. *Тепловая обработка и сушка древесины* / А.И. Расев. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 360 с. 5. Safonov A.O. *The new multicriterial energy-saving system of control in veneer sheet drying* / A.O. Safonov, S.V. Sergeev // *VI<sup>th</sup> International Symposium, "Composite wood materials"*, Zvolen. – June 21–23, 2006. – №6. – С. 82–287. 6. Рудобаишта С.П. *Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке* / С.П. Рудобаишта // *Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. науч.-практ. конф.* – М., 2005. – Т. 1. – С.7–17. 7. Светлов Ю.В. *Кинетика сушки и гидравлическое сопротивление однородных пакетов тканей при фильтрационном движении воздуха* / Ю.В. Светлов // *Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. науч.-практ. конф.* – М., 2005. – Т. 1. – С. 367–370. 8. Atamanjuk V. *Mass exchange dynamics during second filtration drying period* / V. Atamanjuk, Ja. Gumnytskyj // *Chemistry and Chem. Technology*. – 2009. – Vol. 3, No 2. – P 129 – 137. 9. Білей П.В. *Методика дослідження фільтраційного сушіння пакета шпону* / Білей П.В., Микичак Б.М., Кіндзера Д.П. // Науковий вісник НЛТУУ "Збірник науково-технічних праць". – 2012. – Вип. 22.4. – С.123–127. 10. Микичак Б.М. *Гідродинаміка фільтраційного сушіння пакета шпону* / Б.М. Микичак, П.В. Білей, Д.П. Кіндзера // Науковий вісник НЛТУУ "Збірник науково-технічних праць". – 2012. – Вип. 22.5. – С.148–154. 11. Кіндзера Д.П. *Пакетне сушіння шпону фільтраційним методом* / Д.П. Кіндзера, Б.М. Микичак // 2-й Міжнар. конгрес "Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування". – Львів, 19–20 вересня 2012 р. НУ "ЛП". – Львів: ЗУКЦ 2012. – С. 104. 12. Патент на корисну модель № 71548 Україна, F26B 9/06, F26B 5/04, F26B 3/02. *Установка сушіння листових матеріалів* /Атаманюк В.М., Білей П.В., Кіндзера Д.П., Микичак Б.М. – Опубл. 10.07.2012, Бюл. №13. 13. Boris Mykychak. *External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer* / Boris Mykychak, Petro Biley, Diana Kindzera. // *Chemistry and Chemical Technology*. – Lviv Polytechnic National University, 2013. – Volume 7, Number 2. – St. 191–195. 14. Гельперин Н.И. *Основные процессы и аппараты химической технологии*. – М.: Химия, 1981. – 812 с.