

2. Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of the BIPM. A report prepared by the CIPM for the governments of the Member States of the Metre Convention. – Intergovernmental Organization of the Metre Convention, 2007. – 164 p.

3. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. – [Чинний від 1995-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 68 с. – (Державний стандарт України).

4. Мотало В.П. Аналіз основних проблем теорії кваліметричних вимірювань / В.П. Мотало, А.В. Мотало // Стандартизація, сертифікація, якість : зб. наук. праць. – 2011. – № 1. – С. 60-64.

5. Закон України "Про метрологію та метрологічну діяльність", від 05.06.2014 р., № 1314-VII / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Парлам. вид-во, 2014. – 28 с. – (Бібліотека офіційних видань).

6. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К. : Вид-во "Вища шк.", 1983. – 455 с.

7. Шкалы измерений. Термины и определения: ГСИ. РМГ 83-2007. – [Дата введения – 2008-08-01]. – М. : Изд-во "Стандартинформ", 2008. – 24 с. – (Рекомендации).

8. Пфанцагль И. Теория измерений : пер. с англ. В.Б. Кузьмина / И. Пфанцагль. – М. : Изд-во "Мир", 1976. – 166 с.

9. Берка К. Измерения: понятия, теории, проблемы : пер. с чешк. К.И. Иванова / К. Берка. – М. : Изд-во "Прогресс", 1987. – 320 с.

10. Stevens S.S. Philosophy of Science: On the theory of scales of measurement / S.S. Stevens. – Cleveland – New York : Science, 1946.

11. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология : учебник [для студ. ВУЗов]. – Ч. 1. Общая теория измерений / И.Ф. Шишкин. – Изд. 4-ое, [перераб. и доп.]. – СПб. : Изд-во "Питер", 2010. – 192 с.

12. Орлов А.И. Прикладная статистика : учебник [для студ. ВУЗов] / А.И. Орлов. – М. : Изд-во "Экзамен", 2006. – 672 с.

13. Редьога Ю.В. Арифметизация ординальных шкал вимірювання якості програмних засобів / Ю.В. Редьога, Н.А. Яремчук // Інформаційні системи, механіка та керування : наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 7. – С. 5-15.

### **Стадник Б.И., Мотало В.П., Мотало А.В. Шкалы измерений: теория, систематизация и применение**

Рассмотрены и проанализированы основные вопросы теории типов шкал измерений. Приведены виды свойств эмпирических объектов и соответствующие им шкалы измерений. Рассмотрены и проанализированы основные критерии систематизации шкал измерений: метрическая детерминированность, форма получения эмпирических данных и число отображаемых свойств эмпирических объектов. Выбор и использование той или иной шкалы и, соответственно, методики измерения зависит от вида измеряемой величины и способа получения измерительной информации, то есть способа сравнения размеров величин.

**Ключевые слова:** метрология, измерение, шкала величины, шкалы измерений, шкалы наименований, шкалы порядка, шкалы интервалов, шкалы отношений, абсолютные шкалы.

### **Stadnyk B.I., Motalo V.P., Motalo A.V. Measurement Scales: Theory, Systematization and Application**

The basic principles of the theory and systematization types of measurement scales are reviewed and analyzed. The types of properties of empirical objects and a corresponding measurement scale are considered. The main criteria of systematization of such measurement scales as metric determination, a form of obtaining empirical data and the number of properties displayed of empirical objects, are considered and analyzed. The choice and application of the scale type and, therefore, methods of measurement depends on the type of measured value and measuring method of obtaining information, i.e. of the method of comparable size quantities.

**Keywords:** metrology, measurements, quantity-value scale, measurement scales, nominal scales, ordinal scales, interval scales, ratio scales, absolute scales.

УДК 674.047

Доц. І.А. Соколовський, канд. техн. наук;  
проф. І.М. Озарків, д-р техн. наук; доц. М.С. Кобринович,  
канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів

## **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТА ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ КОЛОЇДНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Проаналізовано механізм процесу сушіння вологих матеріалів на прикладі деревини, як типового колоїдного капілярно-пористого тіла. Наведено рівняння, які дають змогу визначити тепломасообмінні параметри. Отримані формули дають змогу розрахувати фактичні (реальні) значення коефіцієнтів теплообміну для періоду постійної та сповільненої швидкості сушіння під час конвективного способу підведення теплоти.

Розкрито особливості процесів товстих і тонких листових матеріалів, як для першого, так і другого періодів сушіння. Проаналізовано особливості періоду сталості і сповільненої швидкостей сушіння. Описано вплив режимних параметрів на температурно-вологісний поля об'єктів сушіння. Показано особливості перенесення вологи під дією капілярного потенціалу, молекулярної та молярної дифузії. Внаслідок оброблення експериментальних досліджень наведено формулу розрахунку критерію Нуссельта і коефіцієнта теплообміну для різних габаритних розмірів штабелів, а також швидкостей сушіння.

**Вступ.** Відомо [1, 2], у сушильній техніці тепломасообмінні процеси аналізують за кривими зміни середньої вологості матеріалу в часі (кривими сушіння) і кривими зміни температури матеріалу в центрі й назовні поверхні його в часі (температурними кривими).

Як показали дослідження з процесів сушіння різних вологих матеріалів рослинного походження під час різних способів підведення тепла до об'єкта сушіння (конвекцією, терморадіацією, кондукцією) за постійних режимних параметрів процес сушіння складається з трьох періодів: періоду початкового прогрівання, періоду постійної швидкості сушіння та періоду сповільненої швидкості сушіння. При цьому в першому періоді сушіння (періоді постійної швидкості сушіння) наявна максимальна інтенсивність випаровування води, яка протягом цього періоду є постійною. Перший період триває до т. зв. критичної точки, що фіксує межу закінчення періоду постійної швидкості сушіння і початок настання сповільненої (спадної) швидкості сушіння, тобто початок другого періоду сушіння.

Проте треба зауважити, що в процесі сушіння тонких листових матеріалів (лушеного та струганого шпону, картону, паперу тощо), коли сам матеріал надходить у сушарку без попереднього нагрівання, то в першому періоді наявне незначне усунення вологи з матеріалу, що пояснюється зрівноваженням дії градієнтів вологості (вологовмісту) і температури. Для відносно дуже тонких листових матеріалів (коли товщина менша ніж 0,80 мм) період постійної швидкості сушіння не спостерігається, тобто настає відразу період сповільненої швидкості сушіння. Інакше кажучи, швидкість сушіння у другому періоді поступово зменшується і наприкінці самого процесу асимптотично наближається до лінії рівноважного вологовмісту, величина якого відповідає цьому режиму сушіння і визначається за діаграмою рівноважної вологості. Температура матеріалу безперервно зростає (поверхневих шарів – швидше, а центральних – повільніше) і прямує наприкінці процесу до температури агента сушіння ( $t_c$ ).

Деякі особливості має процес сушіння, коли температура поверхні вологого матеріалу досягає 100 °C і вище. У цьому випадку спостерігається в пер-

шому періоді сушіння стабілізація температури в центрі матеріалу на рівні 100 °С, а температура поверхні матеріалу стабілізується на дещо більшому рівні (101...103 °С) або процес проходить без стабілізації температури поверхні. Такий розподіл температури у періоді постійної швидкості сушіння свідчить про те, що в середині матеріалу існує сталий надлишковий тиск і виникає молярне перенесення вологи. Найбільш характерним прикладом такого процесу є сушіння деревини, як типового капілярно-пористого колоїдного тіла, за її вологості, вищої за 30 %, у перегрітій парі за атмосферного тиску. Інакше кажучи, коли є високотемпературний процес сушіння, що супроводжується не випаровуванням, а кипінням вологи в деревині ( $t_m \approx 100$  °С). Процес кипіння, на відміну від випаровування води, відбувається за температури (вищої за 100 °С), за якої тиск пари рідини дорівнює тиску навколишнього середовища, тобто коли внаслідок кипіння витискується із простору повітря. Крім того, в разі кипіння води неможливо підвищити температуру випаровуваної фази рідини вище від температури пароутворення до моменту перетворення всієї рідини в пару.

**Теоретичні дослідження.** У загальному випадку густина потоку вологи в деревині під дією градієнтів вологості, температури і тиску описується рівнянням

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = -\alpha'_m \cdot \rho_0 \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \delta_t \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) - \alpha'_m \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де:  $\alpha'_m$  – коефіцієнт вологопровідності;  $\rho_0$  – густина деревини в абсолютно сухому стані, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_t$  – термоградієнтний коефіцієнт;  $\epsilon$  – коефіцієнт молярного перенесення вологи;  $\frac{\partial U}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial t}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial P}{\partial x}$  – відповідно градієнти вологовмісту, температури і тиску.

Зауважимо, що коефіцієнт  $\epsilon$  потребує експериментального визначення і даних про його чисельні значення наразі немає.

**Результати експериментальних досліджень.** На основі результатів власних досліджень процесів сушіння деревини у середовищі атмосферного повітря і перегрітої пари в межах зміни температури поверхні матеріалу  $t_m = 60 \dots 100$  °С, коли перенесення вологи здійснюється під дією капілярного потенціалу, молекулярної та молярної дифузії, отримано формулу для визначення коефіцієнта вологопровідності [2]

$$\alpha'_m = 23,5 \cdot 10^{-8} \left( \frac{T_m}{273} \right)^{23} \cdot \left( \frac{\rho_{i,\phi}}{400} \right)^{-3,9} \cdot \left( 1 + \frac{2V_{np}}{100} \cdot \frac{\sin \beta}{\sin 90^\circ} \right), \text{ см}^2/\text{с}, \quad (2)$$

де:  $T_m$  – температура матеріалу, яка дорівнює температурі мокрого термометра, К;  $\rho_{i,\phi}$  – базова густина будь-якої породи деревини (сосни, липи –  $\rho_\phi = 400$  кг/м<sup>3</sup>; бука –  $\rho_\phi = 530$  кг/м<sup>3</sup>; дуба –  $\rho_\phi = 560$  кг/м<sup>3</sup>; берези –  $\rho_\phi = 500$  кг/м<sup>3</sup>);  $V_{np}$  – об'єм серцевинних променів у деревинній речовині (сосни – 6 %, берези – 11 %, клена – 15 %, дуба – 25 %, бука – 35 %);  $\beta$  – кут, утворений дотичною до річних кілець і нормаллю, проведеною до зовнішньої площини посередині ширини сортименту (для радіального потоку вологи  $\beta = 90^\circ$ , а для тангентального –  $\beta = 0^\circ$ ).

Граничні умови для конвективного сушіння для низькотемпературного процесу сушіння будуть мати вигляд [1, 2]

$$\alpha_k (t_c - t_m) = r \cdot q'_m + \rho_\phi \cdot c \cdot R \frac{dt}{d\tau}, \quad (3)$$

де:  $\alpha_k$  – коефіцієнт конвективного теплообміну;  $r$  – питома теплота пароутворення;  $q'_m$  – інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалу;  $c$  – питома теплоємність вологи деревини;  $R$  – характерний розмір ( $R = S_1/2$ , де  $S_1$  – товщина матеріалу).

Інтенсивність сушіння деревини в періоді постійної швидкості сушіння визначають за формулою

$$q'_m = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{r \cdot L} (T_c - T_m), \quad (4)$$

де:  $Nu$  – критерій Нуссельта;  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, як агента сушіння;  $L$  – ширина штабеля (або матеріалу для одиничного сортименту).

Величину критерію Нуссельта можна визначити за виразом

$$Nu = 0,0641 \cdot Re^{0,80} \left( \frac{T_c}{T_m} \right)^2 \cdot Pr^{0,33} \cdot \left( 1 - \frac{1}{Re_{\phi,m}} \cdot \frac{\epsilon_{um}}{S_1} \right)^4, \quad (5)$$

де:  $Re$  – критерій Рейнольдса для повітря ( $Re = (\omega_y - S_1) / \nu$ ,  $\omega_y$  – швидкість циркуляції агента сушіння,  $S_1$  – товщина матеріалу;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря);  $Pr$  – критерій Прандтля ( $Pr = N / a$ ,  $a$  – коефіцієнт теплопровідності);  $Re_{\phi,m}$  – критерій Рейнольдса для поверхні випаровування вологого матеріалу ( $Re_{\phi,m} = (\omega_y - \epsilon_{um}) / \nu$ ).

Коефіцієнт теплопровідності повітря (середовища)

$$\lambda_c = [4,67 - (4,16 + 2,45 \cdot \phi)] \cdot 10^{-2} + (7,14 + 4,46 \cdot \phi) \cdot 10^{-5} T_c, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С}), \quad (6)$$

де  $\phi$  – відносна вологість (ступінь насичення) повітря.

Величину коефіцієнта кінематичної в'язкості вологого повітря можна розрахувати за таким виразом [3]:

$$\nu = [0,113 \cdot T_c - (18,24 + 7,0 \cdot \phi)] \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (7)$$

Тоді коефіцієнт теплообміну можна визначити за формулою

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{\epsilon_{um}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}), \quad (8)$$

де  $\epsilon_{um}$  – ширина штабеля.

Швидкість сушіння у періоді постійної швидкості сушіння

$$N = \frac{100 \cdot (t_c - t_m) \cdot \alpha_k}{\rho_\phi \cdot r \cdot R}, \text{ \%}/\text{с}. \quad (9)$$

Питома теплота пароутворення залежить від температури і може бути розрахована

$$r = 2490 \cdot (1 - 0,01 \cdot t_m), \text{ кДж}/\text{кг}. \quad (10)$$

У першому періоді, як відомо, температура поверхні матеріалу є практично постійною ( $dt/d\tau \rightarrow 0$ ). Це означає, що величину коефіцієнта можна визначити за формулою

$$\alpha_k = \frac{\rho_0 \cdot R \cdot r \cdot \frac{dW}{d\tau}}{100(t_c - t_{нм})}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (11)$$

Величина тиску перегрітої пари пропорційна добутку концентрації молекул на температуру, тобто

$$P = C \cdot k \cdot T, \text{ Па}, \quad (12)$$

де:  $C$  – концентрація газу в одиниці об'єму;  $k$  – стала Больцмана ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  – температура газу (пари).

Враховуючи те, що концентрацію  $C$  можна представити як

$$C = V \cdot \rho_0, \quad (13)$$

то рівняння (12) можна переписати як

$$P = V \cdot \rho_0 \cdot k \cdot T, \text{ Па}, \quad (14)$$

де  $V$  – вологовміст, кг/кг сухого матеріалу.

Таким чином, рівняння (14) дає змогу спрогнозувати дію тиску пари всередині деревини під час її сушіння.

**Висновок.** Внаслідок проведених теоретичних й експериментальних досліджень отримано формули, які дають змогу оцінити стан перебігу сушіння деревних матеріалів, а також спрогнозувати інтенсивність перебігу тепломасообмінного процесу залежно від режимних параметрів процесу. Отримані формули дають змогу визначити коефіцієнти теплообміну в першому та другому періодах сушіння.

### Література

1. Озарків І.М. Використання сонячної енергії у промисловості : навч. посібн. / І.М. Озарків, Й.С. Мисак, З.П. Копинець; за ред. д-ра техн. наук І.М. Озарківа. – Львів : Вид-во НВФ "Українські технології", 2008. – 276 с.
2. Озарків І.М. Теплові процеси деревообробки : навч. посібн. / І.М. Озарків, П.В. Білей, В.М. Максимів, І.А. Соколовський. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2008. – 264 с.
3. Озарків І.М. Основи аеродинаміки і тепломасообміну : навч. посібн. / І.М. Озарків, Л.Я. Сорока, Ю.І. Грищок. – К. : Вид-во ІЗМН, 1997. – 280 с.

### **Соколовский И.А., Озаркив И.М., Кобринович М.С. Теоретические исследования кинематики и динамики процесса сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов**

Проанализирован механизм процесса сушки влажных материалов на примере древесины, как типичного коллоидного капиллярно-пористого тела. Приведены уравнения, позволяющие определить тепломассообменные параметры. Полученные формулы дают возможность рассчитать фактические (реальные) значения коэффициентов теплообмена для периода постоянной и замедленной скорости сушки при конвективном способе подвода теплоты. Раскрыты особенности процессов толстых и тонких листовых материалов, как для первого, так и второго периодов сушки. Проанализированы особенности периода устойчивой и замедленной скоростей сушки. Описано влияние режимных параметров на температурно-влажностные поля объектов сушки. Показаны особенности переноса влаги под действием капиллярного потенциала, молекулярной и молярной

диффузий. В результате обработки экспериментальных исследований приведена формула расчета критерия Нуссельта и коэффициента теплообмена для различных габаритных размеров штабелей, а также скоростей сушки.

### **Sokolovskyy I.A., Ozarkiv I.M., Kobrynovych M.S. Theoretical Investigation of Kinetics and Dynamics of the Process of Drying of Capillary-porous Colloidal Materials**

The analysis of mechanism of the process of drying of moist materials is made on the example of wood as a typical colloidal capillary-porous body. The equations which allow determining heat exchanging parameters are proposed. Obtained formulas enable calculating the actual (real) coefficients of heat transfer for a period of constant and slow speeds during convective drying method of heat input. The features of the process of thick and thin sheet materials for both the first and second periods of drying are described. Some peculiarities of the periods of stable and slow drying speeds are analyzed. The effect of operational parameters on the temperature and humidity fields of drying facilities is described. Some features of transferring moisture under the influence of capillary potential, and also molecular and molar diffusions. As a result of experimental studies the formula for calculating Nusselt criterion and the coefficient of heat transfer for different dimensions of stacks and drying speeds are provided.

**Keywords:** drying, colloidal capillary-porous material, heat transfer, convective drying method.

УДК 378.14.004:004.9

Доц. О.Л. Сторожук, канд. техн. наук;  
проф. Я.І. Соколовський, д-р техн. наук – НЛТУ України, м. Львів

### **ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ НАВЧАЛЬНИХ КУРСІВ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ**

Наведено синтезовану дидактичну модель, яка описує зв'язки та відношення в інформаційно-комунікаційних технологіях у процесі самостійної та індивідуальної роботи студентів. Цю модель апробовано на кафедрі інформаційних технологій Національного лісотехнічного університету України та запропоновано для використання у дистанційному навчанні у тому ж університеті. Така модель дає змогу покращити організацію самостійної та індивідуальної роботи студентів, сформувати карту їх самостійної роботи, підвищити ефективність вивчення навчального матеріалу. Крім того, вона створює організаційно-методичні засади щодо розвитку мотивації студентів до навчання, формує у них навички практичної, самостійної та науково-дослідної роботи.

**Ключові слова:** система дистанційного навчання, дидактична модель, самостійна та індивідуальна робота, LMS Moodle, служби Google Apps.

**Актуальність.** Упродовж останнього десятиліття в Україні активно відбувається інформатизація освіти та суспільства, що сприяє застосуванню сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для організації навчального процесу за будь-якою формою навчання. Зокрема, для опрацювання лекцій, підготовки та проведення лабораторних і практичних робіт, а також розроблення методичного і дидактичного забезпечення самостійної, індивідуальної роботи, контрольних заходів.

Застосування електронних навчальних курсів інтенсифікує навчальний процес та покращує зворотний зв'язок між викладачем і студентом [1]. Запровадження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій є важливим чинником, котрий сприяє формуванню "змішаної" системи освіти в Україні. Як зазна-