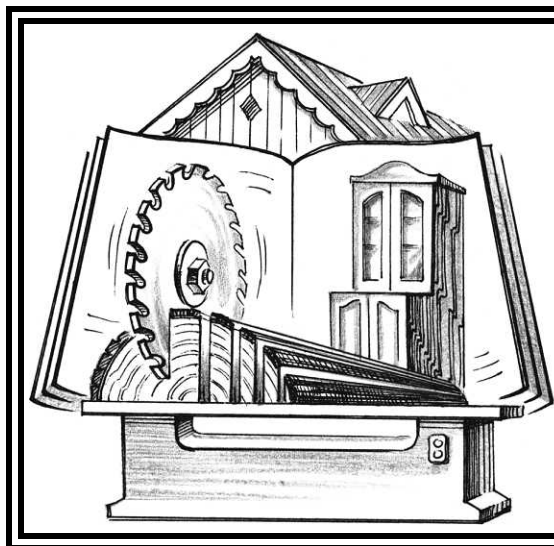




3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

УДК 674.047

*Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук;
ст. викл. І.А. Соколовський;
інж. Ю.Л. Безноско – НЛТУ України, м. Львів*

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РЕЖИМУ СУШІННЯ НА КІНЕТИКУ ПРОЦЕСУ

Розглянуто вплив температури повітря, його відносної вологості та швидкості руху по штабелю на гігроскопічно-рівноважний стан, рівень критичної вологості та кінетику процесу сушіння.

*Prof. P.V. Bilej; senior teacher I.A. Sokolovsky;
eng. Yu.L. Beznosko – NUFWT of Ukraine*

Regularity of drying regime effect on the process kinetics

A effect of air temperature its relative moisture and motion velocity across the oiles on gidroscopic-equilibrium state and the level of critical moisture content on the process kinetics.

Режим конвективного сушіння (нагрітим повітрям, газами) вологих матеріалів характеризується трьома параметрами: температурою повітря – t_c , його відотною вологістю – φ і швидкістю руху повітря – v . Ці параметри впливають на швидкість сушіння, рівень критичної вологості матеріалу, гігроскопічно-рівноважний стан і технологічні властивості та якість матеріалу. Тому необхідно використовувати такий режим, що за мінімальної тривалості процесу сушіння та найменшій витраті тепла дає змогу отримати найкращі технологічні якості висушеного матеріалу. Здебільшого, оптимальний режим сушіння важко створити у сушарках визначеної конструкції і тому в реальній ситуації підбирають раціональний режим, який за окремими параметрами відрізняється від оптимального, але є придатним за даних конкретних умов [1, 2].

Сушіння є комплексним процесом, в якому теплотехнічні і технологічні закономірності взаємопов'язані між собою. Кінетика процесу сушіння визначається як тепло- і масообміном між поверхнею матеріалу і середовищем, так і перенесенням тепла і вологи всередині тіла. Варто відзначити, що технологічні сторони процесу є вирішальними для вибору режиму. Також варто відзначити, що деревина є капілярнопористим колоїдним матеріалом.

Форма зв'язку поглинутої речовини (вологи) з речовиною самого тіла здійснює основний вплив на механізм перенесення тепла і вологи всередині тіла, а також на технологію сушіння. Матеріали, які потрібно висувувати, мають різну форму зв'язаної вологи. Якщо основна частина вологи зв'язана осмотично, то такий матеріал за своїми властивостями наближається до колоїдних тіл і закономірності процесу сушіння такого тіла мають ознаки (закономірності) сушіння колоїдних матеріалів. Якщо основна маса вологи є адсорбційно та капілярно зв'язаною, то закономірності процесу мають ознаки сушіння капілярнопористих матеріалів.

У сушарках режим сушіння змінюється впродовж процесу, тобто сушіння відбувається при змінних режимних параметрах. Суворий аналіз кінетики процесу сушіння за таких умов є надзвичайно складним. Щоб виявити основні закономірності кінетики процесу сушіння розглянемо вплив кожного чинника (температури повітря – t_c , відносної вологості повітря – φ , швидкості руху повітря – v) окремо. Криві кінетики сушіння також потрібно систематизувати за кожним з цих чинників. Наприклад, якщо вивчається вплив температури, то на графіки наносяться криві сушіння, які відповідають різним значенням температури повітря, але для постійних значень відносної вологості і швидкості руху повітря. Якщо початкова вологість матеріалу є різною, то криві сушіння можуть бути приведеними до одної початкової вологості шляхом зміщення їх по вісі абсцис за умови, якщо зміщення не виходять за межі критичної вологості.

Найбільш виразно вплив режиму сушіння на кінетику процесу можна виявити на кривих інтенсивності (швидкості) сушіння, які представляють графічну залежність між інтенсивністю сушіння і вологістю матеріалу. Їх можна використати також для якісного аналізу впливу режиму сушіння на кінетику процесу. З підвищенням температури повітря збільшується інтенсивність сушіння та значення критичного вологовмісту.

Відносна вологість повітря (φ) істотно впливає на інтенсивність сушіння у період постійної швидкості. У період спадаючої швидкості вологість повітря має значення тільки у першій частині цього періоду, а потім вона майже не впливає на інтенсивність сушіння. Збільшення вологості повітря різко знижує інтенсивність сушіння і значення критичної вологості, але для низьких температур підвищення вологості повітря мало впливає на інтенсивність сушіння у другому періоді.

Збільшення швидкості руху повітря (v) помітно підвищує інтенсивність сушіння у першому періоді і значно меншою мірою впливає у кінці процесу сушіння. Із збільшенням швидкості руху повітря (при постійних t_c , φ) інтенсивність у першому періоді збільшується, а коефіцієнт вологопровідності a'_m мало змінюється, тобто при $t_c = const$ також і $a'_m = const$. Тому, збільшення швидкості руху повітря збільшує критичну вологість, а вологість на поверхні колоїдних тіл майже дорівнює границі гігроскопічності ($W_{II} \approx W_{IT}$) і не змінюється з підвищенням швидкості руху повітря.

Збільшення критичної вологості, коли мала інтенсивність сушіння, пов'язане із збільшенням вологообмінного критерію Кірпічова. Якщо знехтувати впливом температурного поля, то можна записати:

$$\overline{W}_{кр} = W_{нк} + \frac{1}{\Pi} Ki'_m \frac{\overline{W}_0}{100}, \quad (1)$$

де: $W_{п.к}$ – приведена критична вологість; Ki'_m – масообмінний критерій Кірпічова, який пропорційний відношенню інтенсивності сушіння (j_m) до коефіцієнта дифузії води (a'_m), Π – показник форми матеріалу (для пиломатеріалів $\Pi = 1$).

Як вже вказувалось вище, збільшення вологості повітря зменшує інтенсивність сушіння (j_m) і збільшує коефіцієнт дифузії (вологопровідність – a'_m). Цей факт пояснюється тим, що з підвищенням вологості повітря (при його постійній температурі) температура тіла зростає, а відповідно буде збільшуватись коефіцієнт теплопровідності – a'_m , але зменшується зовнішній теплообмін, тому інтенсивність сушіння (j_m) зменшується. Іншими словами, збільшення відносної вологості повітря (φ) викликає різке зменшення теплообмінного критерію Кірпічова. У результаті цього підвищення (φ) при $t_c = const$, зменшує критичну вологість.

Підвищення температури повітря (при $\varphi = const$) викликає одночасне збільшення j_m і a'_m . Коефіцієнт a'_m з підвищенням температури матеріалу збільшується: при низьких температурах повільно, а в області високих температур дуже різко. Тому відношення j_m/a'_m , яке входить у критерій Кірпічова, Ki'_m , спочатку (область низьких температур) збільшується при підвищенні температури t , а потім зменшується. У результаті цього критична вологість з підвищенням температури повітря змінюється по кривій, яка має максимум. Вологість на поверхні тіла $W_{п}$ з підвищенням температури змінюється незначно порівняно із зміною відношення j_m/a'_m .

$$a' = \varphi(t_c), \quad a'_m = f(t_m).$$

Зміна режимних параметрів t_c , φ , v впливає на критичну вологість $W_{кр}$ таким чином: з підвищенням швидкості руху повітря – v (при $t_c = const$, $\varphi = const$) критична вологість (рис. 1) збільшується (залежність $W_{кр} = f_1(v)$); з підвищенням відносної вологості повітря – φ (при $t_c = const$, $v = const$) значення $W_{кр}$ зменшується (залежність $W_{кр} = f_2(\varphi)$); з підвищенням температури – t_c (при $\varphi = const$, $v = const$) значення $W_{кр}$ змінюється за залежністю $W_{кр} = f_3(t_c)$.

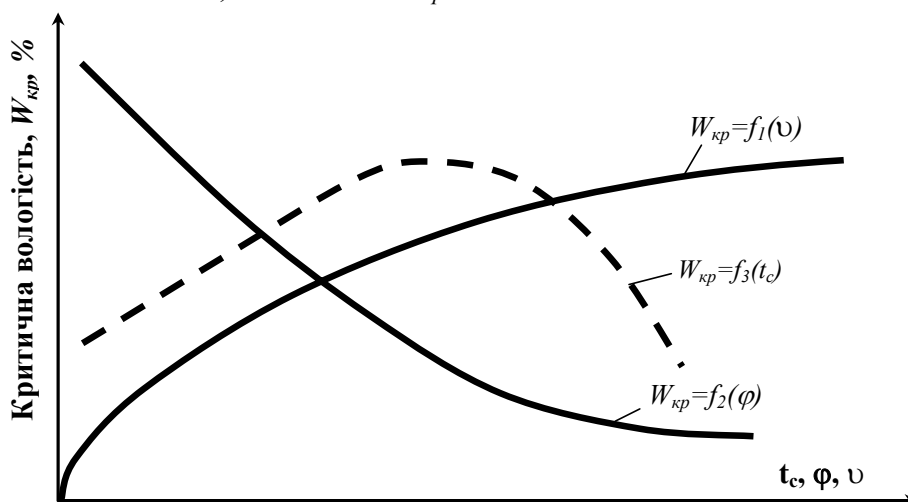


Рис. 1. Залежність $W_{кр}$ від (t_c , φ , v)

Приведена критична вологість є основною характеристикою технологічних властивостей матеріалу, який визначає величину коефіцієнта сушіння і початок періоду спадаючої швидкості. Величину приведенного критичного вологовмісту можна визначити за кривою швидкості сушіння або за значенням відносного коефіцієнта сушіння K , тобто

$$W_{к.п.} = \frac{N}{K} + W_p = \frac{1}{x} + W_p. \quad (2)$$

Така залежність $W_{к.п.}$ від режиму сушіння дає змогу для інженерних розрахунків користуватись для змінних режимів (коли у процесі сушіння змінюються режимні параметри – t_c та φ) формулою

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{кр} - W_p) - \frac{K}{2,3} \tau. \quad (3)$$

На швидкість сушіння впливає не тільки швидкість руху повітря (v), але і його напрямок відносно матеріалу. Вплив напрямку потоку є особливо помітним у перший період сушіння і майже не має значення у кінці процесу.

На швидкість сушіння впливає також і теплове випромінювання від оточуючих предметів: стін сушарки, калорифера, екрана, повітропроводів, які розміщені у середині сушарки. Вплив випромінювання є помітним, коли є істотна різниця температур випромінювача (наприклад, калорифера) і приймача (матеріалу). Якщо ця різниця є невеликою, то випромінюванням можна нехтувати. Додатковий потік тепла випромінюванням діє на швидкість сушіння у вигляді дії екранованих поверхонь на збільшення температури матеріалу, а, отже, і швидкості сушіння.

Швидкість сушіння у першому періоді з врахуванням випромінювання дорівнює:

$$N = \frac{100}{R_V \rho_0} \left[\frac{\alpha}{r_0} (t_c - t_{нов}) + \frac{C\sigma}{r_0} (T_1^4 - T_2^4) \right], \quad (4)$$

де: T_1 – температура випромінювача ($T = 273 + t$, °C); T_2 – температура поглинач енергії (матеріалу); σ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; C – постійна випромінювання, яка враховує коефіцієнт поглинання тепла поверхнею матеріалу і характер взаєморозміщення випромінювальних поверхонь.

У виробничих умовах матеріал завантажують у сушарку у вигляді багаточисельних зразків, розміщених на близькій відстані один від одного. З метою підвищення продуктивності сушарки бажаним є більш щільне укладання матеріалу. Зупинимось на питанні про вплив на швидкість сушіння закритих для випаровування поверхонь матеріалу.

Поверхні зразка матеріалу, які дотикаються один з одним або з полицями, називають екранованими; кількість вологи, що випаровується через ці поверхні є мізерною порівняно з випаровуванням з відкритою поверхнею. Однак зменшення швидкості сушіння відбувається не пропорційно до зменшення поверхні випаровування. При несиметричному випаровуванні з поверхні необмеженої пластини її температура визначається за формулою:

$$t_{(x)} = t_c - \frac{r_0}{2\alpha} \left[(j_1 + j_2) + \frac{x}{R} (j_1 - j_2) \frac{1}{1 + Bi^{-1}} \right], \quad (5)$$

де: j_1, j_2 – відповідна інтенсивність випаровування на поверхнях пластини; Bi – критерій Біо; R – половина товщини пластини.

Якщо інтенсивність випаровування з обох поверхонь є однаковою $j_1 = j_2$ і дорівнює інтенсивності випаровування з відкритої поверхні води, то

$$t_x = t_c - \frac{r_0}{\alpha} = t_m. \quad (6)$$

Допустимо, що одна поверхня пластини має вологоізоляцію $j_2 = 0$, а на другій поверхні інтенсивність випаровування дорівнює інтенсивності випаровування води з відкритої поверхні $j = j_1$. Насправді інтенсивність (j_1) буде більшою за інтенсивність випаровування з відкритої поверхні за рахунок притоку тепла через вологоізольовану поверхню. У цьому випадку температура відкритої поверхні дорівнює:

$$t_{(R)} = t_c - \frac{r_0 j}{\alpha} \left(1 + \frac{1}{1 + Bi^{-1}} \right), \quad (7)$$

де j – інтенсивність випаровування, дорівнює $j = \frac{\alpha}{r_0} (t_c - t_{\text{нов}})$.

Досліди доводять, що зменшення поверхні випаровування у 2 рази зменшує інтенсивність сушіння, а відповідно і швидкість сушіння приблизно тільки на 30 %. Цей приклад пояснює причину однакової швидкості сушіння зразків матеріалу при нерівномірному обтіканні їх потоком повітря або при дотику зразків між собою.

Основні кінетичні характеристики. Основними кінетичними характеристиками процесу сушіння вологих матеріалів є температурний коефіцієнт сушіння B і коефіцієнт сушіння K . Температурний коефіцієнт сушіння B є функцією вологовмісту і визначається емпіричними формулами за величиною критеріїв Косовича (Ko) і Ребіндера (Re), $B = ReKo$. Коефіцієнт сушіння розраховують за величиною швидкості сушіння у першому періоді (N) і відносним коефіцієнтом сушіння (χ), який у першому наближенні вираховується за співвідношенням $\chi = 1,8/U_0$ залежно від початкового вологовмісту – U_0 .

Критерій Ребіндера визначається за емпіричними формулами залежно від вологовмісту ($\bar{U}$) і питомої теплоємності (C) вологого тіла. Тут $C = C_0 + C_s \bar{U} = C_0 + \bar{U}$, де C_0 – теплоємність абсолютно сухого тіла, а C_s – теплоємність рідини (для води $C_s = 1,0$). Тому доцільно критерій Ребіндера визначати за відношенням до абсолютно сухого тіла (його теплоємності – C_0), тоді $Re_0 = C_0 \cdot b/r_0$.

Критерій Косовича розраховується за величиною питомої теплоти випаровування (r_0), питомої теплоємності (C) та заданим значенням вологовмісту ($\bar{U}_0$) і температури тіла.

Таким чином, коефіцієнт дифузії (вологopровідності – a'_m) у першому наближенні для даного матеріалу можна визначити залежно від вологовмісту тіла і його температури. Якщо не можна знехтувати явищем термодифузії

(при високих температурах сушіння), то потрібно визначати відносний коефіцієнт термодифузії вологи – δ . Вказаних вище критеріїв достатньо для розрахунку кінетики процесу сушіння тіла і його температури у період спадаючої швидкості сушіння. У період постійної швидкості сушіння інтенсивність теплообміну – q (Дж/(м²·с)) і вологообміну – j (кг/(м²·с)) визначаються за наведеними вище формулами тепло – і масообміну. При цьому між q та j існує простий взаємозв'язок $q = jr_0$. Знаючи основні параметри, які характеризують процес сушіння та його основні кінетичні характеристики процесу сушіння вологого матеріалу, можна визначити тривалість сушіння і застосувати потрібний режим, щоб отримати найкращі результати.

Чинником, який сприяє поглибленню зони випаровування, є наявність температурного градієнта, під впливом якого волога переміщується за напрямом потоку тепла. Щоб зменшити підведення вологи до поверхні j потрібно зменшити коефіцієнт вологопровідності a_m і збільшити величину $\delta dt/dU$. Коефіцієнт термовологопровідності δ із зменшенням вологості також зменшується, тому в міру сушіння потрібно збільшувати величину dt/dU . Ця величина визначається з температурної кривої $t = f(U)$, як тангенс кута $\tan \psi$ нахилу дотичної до вісі вологості (вологовмісту), тобто $\tan \psi = dt/dU$.

Вибір раціонального режиму сушіння визначається такими вимогами:

- якість висушеного матеріалу;
- збереження фізико-механічних властивостей деревини;
- мінімальна тривалість процесу сушіння;
- мінімальна усадка;
- технічна та технологічна реалізація режиму у сушильних камерах.

Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини (монографія). – Коломия: Вік. – 2005. – 364 с.
2. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

УДК 66.047

*Проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук; аспір. Т.І. Римар;
О.М. Креховецький, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"*

ГІДРОДИНАМІКА І КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ ПІД ЧАС ІЧ-НАГРІВАННЯ

Наведено результати досліджень гідродинаміки та кінетики комбінованого сушіння глини з використанням ІЧ-нагрівання. Показано характер гідродинамічних залежностей, які змінюються зі зміною висоти шару глини. Вивчено кінетику процесу сушіння глини комбінованим способом.

Prof. Ya.M. Hanyk; T.I. Rymar; O.M. Krehovets'kyj – NU "L'vivs'ka Politekhnik"

Hydrodynamics and kinetics of process of drying of clay in a dense layer during the infrared heating

In work the results of researches of hydrodynamics and kinetics of the combined drying of clay are resulted with the use of the infra-red heating. Character of hydrodynamic