

5. Sokolovskyy Ya.I. Analysis of stressed-strained of lumber in drying process.// Naukovyi visnyk, 8.1: 156-165. – Lviv, USUFWT, 1998 (Ukrainian language).
6. Sokolovskyy Ya.I. Technological stresses and strains of wood in drying process.// Naukovyi visnyk, 9.3: 168-176. – Lviv, USUFWT, 1999 (Ukrainian language).
7. Sokolovskyy Ya.I. Identification of stressed-strained state of lumber with taking into account deepening of moisture evaporation zone.// Naukovyi visnyk, 9.5: 89-93. – Lviv, USUFWT, 1999 (Ukrainian language).
8. Sokolovskyy Ya.I. Mutual connection of stressed-strained state of drying wood with parameters of internal and external processes of mass heat transfer.// Naukovyi visnyk, 9.6: 64-68. – Lviv, USUFWT, 1999 (Ukrainian language).
9. Sokolovskyy Ya.I. Stressed-strained state of logs in drying process.// Naukovyi zapysky Ukrainskoi akademii drukarstva. Naukovo-tehnichniy zbirnyk, 2: 20-22.- Lviv, 2000 (Ukrainian language).
10. Sokolovskyy Ya.I. Computation of stressed-strained wood state with cosinusoidal law of distribution of moisture content.// Visnyk Tehnologichnogo universytetu Podilla. Tehnichni nauky, part 2: 191-193. – Hmelnytsky, 2000 (Ukrainian language).
11. Sokolovskyy Ya.I., Andrashek J.V. Methodics and results of experimental researches of rheological behaviour of wood.// Naukovyi visnyk, 9.13: 15-26. – Lviv, USUFWT, 1999
12. Sokolovsky Ya.I., Poberejko B.P., Filinjuk R.V. Technological stresses and strains of wood in the process of drying.// XII Konferencja Naukowa Wydzialu Technologii Drewna SGGW "Drewno-material o wszechstronnym przeznaczeniu i zastosowaniu". – Warszawa. – 1999. – p. 377-389.
13. Pat. 23818 A, Ukraine, МКИФ26 В25/22. System of automatic regulation of drying process with taking into account its physical-mechanical state.// Sokolovsky Ya.I., Safarov V.O., Knysh Yu.V. (Ukraine); Published 16.06.98 (Ukrainian language).

УДК 674.047

Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук – УкрДЛТУ

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ КАПІЛЯРНОПОРИСТИХ КОЛОЇДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто фізичні особливості та ефективність кондуктивного, радіаційного, електричного та конвективного способів сушіння капілярнопористих колоїдних матеріалів.

Prof. P.V. Biley – USUFWT

Analysis of basic of colloid materials drying methods

Considered the physical peculiarities and effectiveness conduction, radiation, electric and convection drying methods of colloid materials.

Капілярнопористі колоїдні матеріали охоплюють широкий спектр речовин, в основному, органічного походження. Деревина, яка входить до цього класу матеріалів, має складну анатомічну будову і фізико-механічні властивості. Особливість будови деревини полягає в тому, що при початковому зволоженні вона має явно виражені колоїдні властивості, а в подальшій полімолекулярній конденсації – властивості капілярнопористого тіла.

Процес видалення вологи з капілярнопористих колоїдних матеріалів супроводжується порушенням її зв'язку з тілом, на що потрібно витрачати значну кількість енергії. Тому, класифікація форм зв'язку тіл з вологою побудована за принципом інтенсивності цього зв'язку. У цьому ж напрямку доцільно провести аналіз ефективності різних способів сушіння та їх комбіна-

цій. За особливостями передачі тепла до висушуваного матеріалу сформульовано чотири основні способи сушіння: кондуктивний (контактний), електричний, радіаційний (тепловим випромінюванням) та конвективний. Кожний з цих способів можна розділити на види та підвиди, яких найбільше має конвективний. Можлива комбінація окремих способів, видів та підвидів, якщо одночасно використовуються різні способи передачі тепла або суміщаються інші ознаки. У чистому виді названі вище основні способи зустрічаються рідко, частіше переважаючим є той чи інший метод передачі тепла, який доповнюється іншим. Таким чином, аналіз ефективності способів сушіння є актуальною і різноплановою задачею.

Кондуктивне сушіння характеризується передачею тепла на нагрівання вологого матеріалу і випаровування з нього вологи від нагрітої поверхні. Кондуктивний спосіб сушіння широко використовується в промисловості для сушіння паперу та інших тонких листових матеріалів. Основними параметрами, які визначають кінетику процесу кондуктивного сушіння, є температура гріючої поверхні, ступінь притискання матеріалу до гріючої поверхні, параметри оточуючого середовища.

Основним технологічним параметром є товщина матеріалу. Названі параметри впливають не тільки на швидкість сушіння і на критичний вологовміст, але і на технологічні властивості та якість матеріалу.

Температура гріючої поверхні є основним параметром, який впливає на тривалість контактного сушіння. З підвищенням температури гріючої поверхні тривалість сушіння різко скорочується. Вплив температури гріючої поверхні є істотним протягом всього процесу сушіння, лише в кінці процесу цей вплив зменшується. Температура гріючої поверхні впливає також і на якість висушуваного матеріалу. На тривалість процесу великий вплив має товщина матеріалу. Наприклад, збільшення товщини шпону від 0.22 мм до 0.44 мм веде до збільшення тривалості сушіння майже у три рази. Наступне збільшення товщини веде до ще більшого зростання (на два-три порядки) загальної тривалості сушіння. Сила притискання матеріалу до контактуючої поверхні має незначний вплив на теплофізичну суть процесу, але значною мірою впливає на формування поверхні матеріалу і його загальну якість.

Для практичних розрахунків загальної тривалості контактного сушіння використовують [1] наближену залежність:

$$\tau = \frac{W_0}{N} - \frac{1}{XN} [1 + 2.3lg XW_n], \quad (1)$$

де: N – швидкість сушіння в першому періоді, %/с; X – відносний коефіцієнт сушіння, 1/%; W_0 і W_n – початкова і кінцева вологість матеріалу, %.

Кількість тепла, яка отримана від гріючої поверхні в першому періоді процесу сушіння, витрачається на випаровування та втрати тепла на випромінювання відкритою поверхнею матеріалу в середовищі і на конвективні втрати. Але ці втрати є невеликими (3...5 %) і ними можна знехтувати. Отже,

$$q = r_0 j, \quad (2)$$

де: r_0 – питома теплота пароутворення, кДж/кг; j – інтенсивність випаровування, кг/(м²с).

В умовах контактного сушіння перенесення вологи відбувається у вигляді пари (частка перенесення вологи у рідкому стані дуже мала і нею можна знехтувати), тому розповсюдження тепла в матеріалі здійснюється шляхом теплопровідності і перенесенням пари, тобто:

$$q = \lambda \frac{dt}{dn} + h_n j_n, \quad (3)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/м град; dt/dn – градієнт температури; h_n – ентальпія пари; j_n – інтенсивність перенесення пари.

З рівняння (3) знаходимо густину потоку в перетинах матеріалу, близьких до гріючої поверхні

$$j_n = \frac{r_0 j + \lambda dt / dn}{h_n}, \quad (4)$$

Співставляння величин (q) та $(\lambda dt/dn)$ показує, що потік тепла, зумовлений теплопровідністю є значно меншим від загального потоку тепла (q), тобто механізм теплопровідності не може забезпечити передачу тепла в кількості (q) і вона здійснюється значною мірою перенесенням маси пари. Таким чином, перенесення теплоти парою в середині матеріалу є вирішальним в процесі контактного сушіння тонких капілярнопористих колоїдних матеріалів.

На підставі наведеного вище кондуктивне сушіння не можна рекомендувати для товстих матеріалів, наприклад, пилопродукції. Неєфективним є також кондуктивне нагрівання пиломатеріалів, яке спостерігається у вакуумному та індукційному способах сушіння.

Нагрівання та сушіння матеріалів в електромагнітному полі ґрунтується на явищі поляризації. Вологі матеріали є поляризаційно-релаксаційними системами, в яких прикладена напруга електричного і магнітного полів розповсюджується не миттєво, а з деякою швидкістю, яка характеризується періодом релаксації. Ця властивість вологих матеріалів зумовлює їх нагрівання в змінному електричному полі (сушіння струмами високої частоти).

Відмінною особливістю нагрівання вологих матеріалів струмами високої частоти за умови тепло- і вологоізоляції поверхні тіла і рівномірного початкового розподілу вологовмісту є рівномірне виділення тепла по всьому об'єму вологого тіла за рахунок перетворення електричної енергії в тепло. Це дає змогу отримати дуже велику швидкість підведення тепла або точніше – отримати надзвичайно потужні джерела тепла, які рівномірно розподілені в середині матеріалу. Однак, в реальних умовах процес теплообміну матеріалу з оточуючим середовищем призводить до утворення поля температур, яке, в свою чергу, викликає перенесення вологи, а, відповідно, до утворення полів вологовмісту. Виниклі поля температур і вологовмісту в свою чергу безпосередньо впливають на електричне поле в середині матеріалу, яке і зумовлює процес нагрівання вологого тіла.

На відміну від звичайних способів сушіння, для яких перенесення вологи в середині матеріалу відбувається під дією градієнтів вологовмісту, температури і загального тиску, при сушінні в змінному електромагнітному полі на перенесення вологи впливають термодинамічні рушійні сили, в якості яких прийнято результуючі вектори напруженості електричного та магнітного полів. Вологий матеріал є гетерогенним середовищем, яке складається із скелету і зв'язаної речовини в різних фазових станах. У таких тілах мають місце всі види поляризації, які характерні для напівпровідників та діелектриків. У діелектрику поворот диполів та їх коливання під дією зовнішнього електричного поля зв'язані з виділенням тепла. Таким чином, енергія, яка витрачається на поляризацію діелектрика, генерується у вигляді тепла. Якщо через (Q_v) позначити кількість тепла, яка виділяється в одиниці об'єму матеріалу (Bm/cm^3), можна записати залежність:

$$Q_v = 0,555 E^2 \varepsilon g \delta f, \quad (5)$$

де: E – напруженість зовнішнього електричного поля, в/см; f – частота електричного поля, Гц; ε – діелектрична проникливість або діелектрична стала; δ – кут діелектричних втрат.

Нагрівання вологого матеріалу струмами високої частоти відбувається досить інтенсивно, тому швидкість випаровування на багато разів перевищує швидкість перенесення пари в середині пористого тіла, там виникає градієнт загального тиску, який є основною рушійною силою вологоперенесення в цьому способі сушіння. Даному явищу сприяє дифузія ковзання в мікрокапілярах та ефузійне натікання повітря в мікрокапілярах, оскільки температура в центрі матеріалу є більшою, ніж на його поверхні. На початку процесу високочастотного сушіння температура в середині матеріалу різко зростає, а потім деякий час тримається на рівні температури кипіння води. Далі температура може зростати до великих значень (300...500 °C). Тому нагрівання бажано переривати, але з іншого боку, при вологості матеріалу менше 15...20 %, високочастотний генератор може не включатись через відсутність суцільного електричного поля за умов низької вологості.

У високочастотному полі виникають значні градієнти вологовмісту, які викликають напруження і небезпеку появи внутрішніх тріщин. Змінюючи градієнт температури можна досягнути рівномірного розподілу вологовмісту в середині матеріалу. Тому з технологічної точки зору кращі результати дають комбіновані способи сушіння, що дозволяє майже вдвічі зменшити витрати електричної енергії на процес сушіння. Але навіть із застосуванням оптимальних режимів, сушіння струмами високої частоти для більшості матеріалів є в 3...5 разів дорожчим за конвективне сушіння. Крім того, складність обслуговування обладнання, його висока вартість, ненадійність роботи високочастотних генераторів дають підстави для висновків про передчасність використання даного способу сушіння пиломатеріалів.

Радіаційне сушіння характеризується передачею тепла на нагрівання вологого матеріалу і випаровування з нього вологи інфрачервоними променями. Деколи застосовують спеціальні лампи, які, крім інфрачервоних, виділя-

ють ще і видимі промені. Лампові сушарки мають обмежену галузь застосування, їх використовують тільки у випадках, коли теплоенергетичні показники не мають істотного значення порівняно з тривалістю процесу і якістю готового продукту.

Теплові промені проникають у деревину лише на глибину 7...10 мм. Проникнення інфрачервоних променів в матеріал зменшується із збільшенням довжини хвилі, тобто зменшення температури (за формулою Віна $\lambda_{max}=2886/T$). За основну оптичну характеристику матеріалу приймають коефіцієнт ослаблення променя – k_λ , який визначається з формули Ламберта-Бугера:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda x}, \quad (6)$$

де: I – інтенсивність променевого потоку, який заглибився через шар матеріалу товщиною – x ; I_0 – інтенсивність теплового потоку, який падає на поверхню матеріалу.

Для розрахунку променевого теплообміну потрібно знати також величину коефіцієнта відбивання – k_r , поглинання – k_a , ступінь чорноти тіла – ε та оптично-геометричні характеристики матеріалу. У більшості випадків радіаційне сушіння супроводжується конвективним сушінням нагрітими газами. Ознакою чисто радіаційного сушіння є рівність температури поверхні матеріалу $t_{нов}$ температурі середовища – t_c . У цьому випадку для періоду постійної швидкості сушіння (коли $\frac{df}{d\tau} = 0$) можна записати:

$$q_b = r_0 j = r_0 a'_p (P_{нов} - P_c) = \frac{r_0 D Nu'}{L} (P_{нов} - P_c), \quad (7)$$

де: q_b – поглинутий поверхнею тіла променевий потік; D – коефіцієнт дифузії пари в приповерхневому шарі; a'_p – коефіцієнт радіаційного масообміну; Nu – масообмінний критерій Нусельта; $P_{нов}$ – тиск пари коло поверхні матеріалу, $P_{нов} = P_n$.

У процесі радіаційного сушіння в середині матеріалу можуть формуватись значні градієнти температур Δt по товщині: в першому періоді сушіння $\Delta t = 10...20^\circ\text{C}$, а в другому періоді – $\Delta t = 60...100^\circ\text{C}$. Швидке збільшення температури матеріалу після критичної вологості призводить до тривалої дії високих температур на матеріал, що негативно позначається на структурно-механічних властивостях, технологічних та споживчих якостях деревини. Значний температурний градієнт також негативно впливає на вологопровідність, зменшуючи її через протилежну направленість термовологопровідності. Все це робить недоцільним радіаційний спосіб сушіння пиломатеріалів.

У конвективному способі сушіння тепло до поверхні матеріалу передається шляхом конвекції нагрітого середовища (рідини або газу). Конвективне сушіння ділять на два основні види: конвективно-атмосферне та конвективно-теплове. Останній вигляд деколи називають технічним, оскільки воно вимагає застосування певного обладнання.

Основними особливостями конвективно-атмосферного сушіння є використання теплоти атмосферного повітря, сезонність процесу та низькі температури середовища. Процес атмосферного сушіння пиломатеріалів малоке-

рований і потребує врахування багатьох аспектів: впливу мікроклімату, сонячної радіації, способу складання і розміщення матеріалу, сили і напрямку вітру, характеристики пилопродукції та її призначення. Цей спосіб сушіння потребує проведення додаткових досліджень для створення примусової циркуляції та відповідного мікроклімату, розробки наскрізної технології комбінованого атмосферно-камерного сушіння. Ефективність такого поєднання не викликає жодних сумнівів і підтверджується проведеними дослідженнями і виробничою практикою.

Конвективно-теплове сушіння можна поділити на багато підвидів за тією чи іншою ознакою. За видом середовища розрізняють: сушіння в рідинному або газовому середовищі; сушіння з використанням додаткових ефектів: ротаційне (використовується відцентровий ефект від обертання матеріалу), вакуумне (створення вакууму з різними способами нагрівання матеріалу), адсорбційне (використання для висушування середовища різними адсорбентами), конденсаційне (використання кондиціонерів для нагрівання і висушування середовища). Проаналізуємо їх ефективність.

Для сушіння пиломатеріалів в рідинах, як агенти обробки, може використовуватись нагріта вода, гідрофобні чи гідрофільні рідини. Комбінуючи нагрівання деревини у воді з наступним охолодженням і сушінням на повітрі можна для деяких порід досягти вологості 15...20 %. Сушіння у гідрофобних рідинах (масло, розплави парафіну, сірки, металів) є високотемпературним інтенсивним процесом. Такі матеріали можна використати тільки в окремих галузях (будівництво, транспорт). Сушіння в гідрофільних рідинах доцільно використовувати перед просочуванням матеріалів. Сушіння пиломатеріалів в середовищі топкових газів не дає належної якості. Сушіння в середовищі перегрітої пари – високотемпературний процес, а в середовищі пари органічних речовин є можливим, але недоцільним за багатьма ознаками. Тому у 95...98 % випадків промисловим є використання, як агента сушіння, пароповітряної суміші.

Сушіння деревини, як правило, відбувається із зміною агрегатного стану рідини з витратою значної кількості енергії. Тому ротаційне зневоднення дозволяє видалити вільну (механічно зв'язану з матеріалом) вологу без витрачання теплової енергії. Однак, створення належного ефекту відцентрових сил потребує складного устаткування і ретельного балансування матеріалу на платформі, що є складною технічною проблемою. Адсорбційне сушіння в пароповітряному середовищі використовується в окремих випадках, коли крім сушіння потрібно ще видалити і деякі домішки чи аромати. Конденсаційне сушіння знайшло більш широке застосування через бажання отримати своєрідний "вічний двигун": від кондиціонера отримуємо тепло на нагрівання деревини і випаровування з неї вологи, а конденсація пари (в кондиціонері) дозволяє повернути теплоту пароутворення в сушарку. Ефективність такого способу сушіння є сумнівним, він потребує доопрацювання.

Найбільш розрекламованим способом є вакуумне сушіння. У матеріалі, який розміщений у вакуумі, створюється позитивний градієнт тиску в

напрямку потоку вологи (від центральних до зовнішніх шарів). Для підсилення цього ефекту матеріал потрібно нагріти. Використовують контактне, конвективне та діелектричне нагрівання деревини. Найбільш ефективним є діелектричне нагрівання у полі струмів високої частоти (вакуумно-діелектричне сушіння). Такий спосіб сушіння потребує складного і дорогого обладнання, від чого собівартість сушіння збільшується у 2–3 рази порівняно з конвективним. Контактне нагрівання є громіздким і неефективним, тому застосовується дуже рідко. Конвективне нагрівання використовується двох видів: нагрітим повітрям або водяною парою. Нагріте повітря циркулює примусово в камері, а після нагрівання деревини відсмоктується вакуумним насосом. Аналогічно періодично в камеру запускається насичена пара, матеріал нагрівається до визначеної температури, а потім створюється відповідної глибини вакуум. У нагрітій до температури кипіння води деревині (для даної глибини вакууму) очікується створення надлишкового тиску. Таким чином, всі три рушійні сили повинні інтенсивно переносити вологу до поверхні матеріалу. Однак, очікуваного ефекту вакуумне сушіння не дає і не може дати з тієї причини, що вакуумпроникливість деревини поперек волокон є дуже малою, повітря відсмоктується тільки з поверхневих шарів. Про те, що в центральних шарах немає вакууму, свідчить зростання до високих значень (300...400 °C) температури матеріалу в процесі діелектричного нагрівання (температура деревини не повинна зростати вище температури кипіння води). В процесі конвективного нагрівання температура в матеріалі не досягає точки кипіння ($t_k=100$ °C). Таким чином, переміщення вологи здійснюється тільки за рахунок градієнта вологості, який в поверхневих шарах підсилюється вакуумом (перепадом тиску). Однак, це не дає підстав фірмам, що виготовляють вакуумні сушарки, стверджувати про їх надзвичайну ефективність – вона фізично є неможливою. Тривалість вакуумного сушіння лише на 20...30 % менша за тривалість конвективного.

Висновки. На основі наведеного вище аналізу ефективності різних способів сушіння можна стверджувати, що найбільш дешевим і доступним є конвективне сушіння пилопродукції низькотемпературними режимами. Для досягнення потрібної якості сушіння необхідно застосовувати постійний контроль за вологістю матеріалу і розвитком внутрішніх напружень.

Література

1. Лыков А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 462 с.
2. Билей П. В. Сушка древесины твердых лиственных пород (издание второе). – М.: Экология, 2002. – 224 с.

УДК 628.511

Проф. А.І. Дубинін, д-р техн. наук;

В.В. Майстрок, канд. техн. наук;

доц. Ю.О. Малик, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОПИЛОВОГО ПОТОКУ В ЦИКЛОНІ З ПРОМІЖНИМ ВІДВЕДЕННЯМ ОСАДЖЕНОГО ПИЛУ

Проаналізовано теорію подібності газопилових потоків в інерційних апаратах. Запропоновано математичні моделі для визначення ефективності циклону з проміжним відведенням осадженого пилу.

Prof. A.I. Dubynin, V.V. Maystruk,
doc. Yu.O. Malyk – NU "Lviv'ska Politekhnik"

The mathematical model of dusted the flow of gaze in cyclone with the intermediate diversion of the dust

The theory of similarity of dusted the flow of gas in inertial apparatus is analyzing. The mathematical model for determining of efficacy of cyclone with the intermediate diversion of the dust.

В [1] описана будова і принцип роботи циклону з проміжним відведенням осадженого пилу (циклону з ПВП). З метою визначення прогнозованої ефективності роботи циклону з ПВП була використана теорія подібності газопилових потоків в інерційних апаратах [2], яка складається з системи шести визначальних і п'яти невизначальних критеріїв подібності.

Запишемо і проаналізуємо систему визначальних критеріїв:

$$\text{Но, Re, Fr, } \Delta, R, V \quad (1)$$

де: Но – критерій гомохронності; Re – критерій Рейнольдса; Fr – критерій Фруда; Δ і R – критерії, які характеризують співвідношення в газопилових потоках інерційних сил і сил в'язкості, що діють на частинки з боку потоку; V – безрозмірна концентрація твердої фази в газовому потоці.

Критерій гомохронності Но враховує характер руху в подібних потоках, які не встановилися. Але в циклонах рух газопилових потоків стаціонарний в часі, тобто з визначальних критеріїв гомохронності можна виключити.

Критерій Рейнольдса відображає вплив сил тертя на рух газу, точніше – на характер руху. В циклонних апаратах оптимальний гідродинамічний режим характеризується діапазоном фіктивних швидкостей $V_0=2.5-4$ м/с. Дослідження поля швидкостей при $V_0=2.5$ м/с і $V_0=4$ м/с показали, що розподіл швидкостей в перерізі кільцевого простору циклона має однаковий характер. Це означає, що спостерігається автомоделність потоку, тобто розподіл швидкостей не залежить від Re, і цей критерій також може бути виключеним з числа визначальних.

Що стосується критерію Фруда (Fr), який характеризує вплив сил тяжіння на рух газопилового потоку, то елементарні розрахунки показують, що співвідношення інерційних і гравітаційних сил, які діють на частинки, дуже значні. Наприклад, якщо прийняти в першому наближенні тангенціальну швидкість в кільцевому просторі циклона за таку, що дорівнює вхідній швид-