

Від тривалості обслуговування (ремонту) залежать витрати ресурсів на резервування резервних автомобілів у частинах для забезпечення надійності протипожежного захисту. Окрім того, за умови реалізації другої та третьої організаційних схем виконання ТОР матимемо неефективні витрати часу кваліфікованих майстрів-ремонтників на їх переїзди між загоном технічної служби та пожежними частинами. Водночас скорочення тривалості процесу ТОР потребує резерву запасних частин (деталей, вузлів, агрегатів). Таким чином, маємо залежність витрати ресурсів:

$$R_u = f(\{\lambda_{mp}\}, \{Q_{mp}\}, \{t_{T,mp}\}, \{\Delta t_{o,mp}\}, O_{mp}); \quad (6)$$

$$R_z = f(\{\lambda_{mp}\}, \{t_{pmi}\}); \quad (7)$$

$$R_e = f(\{\lambda_{mp}\}, O_{mp}, I_n, I_{zn}), \quad (8)$$

де:  $R_u, R_z, R_e$  – відповідно витрати ресурсів людських (трудових), уречевлених у резервних агрегатах, вузлах, деталях та поточних на транспортування, МДж;  $O_{mp}$  – організація (організаційна схема) виконання ТОР.

Окрім того, обслуговувально-ремонтні втручання пов'язані з вилученням пожежних автомобілів зі сфери перебування їх в експлуатації у сферу обслуговування-ремонту. Перебування автомобілів у цій сфері оцінюється в автомобіле-днях, а саме

$$R_{np} = f(\{\lambda_{mp}\}, \{t_{mp}\}). \quad (9)$$

Обґрунтовані причинно-наслідкові зв'язки у проекті системи ТОР пожежних автомобілів за станом є важливим етапом обґрунтування її параметрів.

#### Висновки:

1. Система технічного обслуговування пожежної та аварійно-рятувальної техніки із диференціацією за технічним станом потребує розроблення відповідного проекту та моделі.
2. Розроблення та впровадження зазначеної вище системи на регіональному рівні можна втілена у життя завдяки розкриттю комплексної дії факторів процесу обслуговування та ремонту шляхом створення статистичних імітаційних моделей.

#### Література

1. Настанова з експлуатації транспортних засобів в органах та підрозділах ДСНС України (Наказ ДСНС від 27.06.2013 р., № 432).
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М. : Изд-во "Высш. шк.", 1982. – 231 с.
3. Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкович. – М. : Изд-во "Транспорт", 1987. – 272 с.
4. Альянах И.И. Моделирование вычислительных систем / И.И. Альянах. – Л. : Изд-во "Машиностроение", 1988. – 223 с.
5. Сидорчук О.В. Наукові основи інженерного менеджменту технічного сервісу рільництва / О.В. Сидорчук, С.Р. Сенчук, О.В. Кухарук. – Львів : Вид-во Львів. ДАУ, 2001. – 172 с.

**Башинский О.И., Вовк С.Я., Пелешко М.З. Проект системы технического обслуживания и ремонта пожарной и аварийно-спасательной техники: причинно-следственный подход**

Исследованы особенности дифференциации работ по обслуживанию и ремонту пожарной и аварийно-спасательной техники в зависимости от состояния. Проанализированы организационные схемы выполнения работ по обслуживанию и ремонту пожарной и аварийно-спасательной техники в зависимости от состояния. Выявлены причинно-следственные связи факторов влияния на систему технического обслуживания и ремонта пожарной и аварийно-спасательной техники при дифференциации работ по состоянию. Установлено, что для эффективных имитационных моделей необходимо провести качественный анализ причинно-следственных связей между факторами, влияющими на техническое обслуживание и ремонт пожарной и аварийно-спасательной техники.

**Ключевые слова:** пожарно-спасательная техника, техническое состояние, техническое обслуживание, ремонт, система.

#### **Bashynskyy O.I., Vovk S.Ya., Peleshko M.Z. The Project of Maintenance and Repair of Fire and Rescue Equipment: Causal Approach**

The features of maintenance service and repair of fire and rescue equipment according to its condition are described. The organizational scheme of maintenance and repair works of fire and rescue equipment according to its condition is shown and analysed. The relationships of cause and effect in the project of system of maintenance service and repair of fire and rescue equipment according to its condition are revealed. It is established that for the efficient simulation models it is necessary to carry out a qualitative analysis of causal relationships between factors having an impact on maintenance and repair of fire and rescue equipment.

**Keywords:** fire automobiles, technical condition, maintenance service, repair, system.

УДК 004.94:674.047

Ст. викл. В.І. Криштанович;

ст. викл. О.В. Мокрицька, канд. техн. наук – НЛТУ України, м. Львів

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНЕСЕННЯ У ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ ЯК БАГАТОФАЗНОЇ СТРУКТУРИ**

Наведено математичну модель реологічної поведінки деревини як трифазного середовища, що складається з твердої (деревної речовини), рідкої і пароповітряної фаз з урахуванням анізотропії тепломеханічних характеристик. На основі розроблених математичних моделей і прикладних програмних засобів досліджено динаміку зміни температури, вологовмісту, концентрації рідини, пари та пароповітряної суміші і в'язкопружного деформування деревини у процесі сушіння. Встановлено закономірності впливу технологічних факторів конвективного процесу сушіння на процеси тепломасоперенесення деревини різних фаз.

**Ключові слова:** математична модель, в'язкопружне деформування, тепломасоперенесення, багатофазна система, деревина, сушіння деревини.

**Актуальність досліджень.** Математичне моделювання реологічної поведінки колоїдних капілярно-пористих матеріалів має ґрунтуватися на врахуванні особливостей їх анатомічної та структурної будов. Представником капілярно-пористих матеріалів є деревина з "непостійною" полікапілярною структурою клітинних стінок, які характеризуються значною питомою поверхнею. Відомо, що навіть незначна зміна вологості для значень, що є меншими від границі гігроскопічності, істотно впливає на механічну поведінку деревини. Зміна температурно-вологісних умов та напружено-деформівного стану зумовлює перетворення складної капілярно-пористої структури деревних клітин, пов'язаних з особливостями руху вологи у системі капілярів і порожнин. З огляду на це, актуальною задачею є побудова математичної моделі реологічної поведінки дере-

вини залежно від зміни температури і вологості у рамках механіки гетерофазних систем з урахуванням особливостей капілярно-пористої будови і багатозфазності, проведення обчислювальних експериментів та встановлення закономірностей деформування деревини як трифазного середовища у процесі сушіння.

**Аналіз літературних джерел.** Аналіз математичного моделювання напружено-деформівного стану деревини у процесі конвективного сушіння показав, що застосування математичних моделей, що ґрунтуються на квазігомогенних допущеннях, не дає змогу описати реальні процеси зміни температури, вологості, деформативності з урахуванням зміни структури капілярно-пористих матеріалів [6, 7, 9, 11, 13]. Саме ці параметри у процесі фазових перетворень можуть миттєво змінюватися і впливати на динаміку деформаційно-релаксаційних і тепломасових процесів. Тому актуальним завданням є розроблення математичних моделей процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, як трифазного середовища, що складається з твердої фази (деревної речовини), рідкої і пароповітряної фаз. Математичні моделі тепломасоперенесень і деформувань, що враховують багатозфазність капілярно-пористих матеріалів у процесі сушіння, дають змогу прогнозувати особливості зміни вологовмісту, температури окремих фаз, напружено-деформівного стану на всіх етапах процесу сушіння деревини.

**Математичне моделювання процесів.** Математична модель визначення в'язкопружного стану деревини як капілярно-пористого трифазного середовища включає рівняння рівноваги механіки гетерогенних середовищ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_T \langle \sigma_{TX} \rangle_T)}{\partial x} + \frac{\partial(c_T \langle \sigma_{TY} \rangle_T)}{\partial y} + p_T \frac{\partial c_T}{\partial x} + Q_{1,2} &= 0; \\ \frac{\partial(c_T \langle \sigma_{TX} \rangle_T)}{\partial x} + \frac{\partial(c_T \langle \sigma_{TY} \rangle_T)}{\partial y} + p_T \frac{\partial c_T}{\partial y} + Q_{2,2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де:  $c_T$  – об'ємна концентрація твердої фази;  $p_T = -\frac{1}{3} \langle \sigma_T \rangle_T$ ,  $Q_{1,2}$ ,  $Q_{2,2}$  – складники потоків масоперенесення.

Граничні умови характеризують стан деревини у частковий момент сушіння і мають вигляд:

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{TX} \rangle_T = 0, x = 0, x = l_1; \langle \sigma_{TY} \rangle_T = 0, y = 0, x = l_2; \\ \langle \sigma_{TX} \rangle_T = 0, x = 0, x = l, y = 0, y = l_2, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $l_1$ ,  $l_2$  – геометричні розміри поперечного перетину деревини.

Математичні моделі для визначення концентрації рідини, пари, повітря і пароповітряної суміші у деревній пластині запропоновано у вигляді диференціальних рівнянь вологопровідності з граничними умовами, характерними для першого та другого періодів процесу сушіння [1, 9, 13]. ґрунтуючись на розв'язках диференціальних рівнянь вологоперенесення, а також рівняннях стану газової фази і законі Дальтона, з урахуванням частки вільного від рідини об'єму матеріалу, отримано закономірності розподілу перенесення вологості, тепла та концентрації парогазової суміші у деревній пластині.

Математична модель деформаційно-релаксаційних процесів у деревині під час сушіння як трифазному середовищі зі врахуванням анізотропії тепломеханічних характеристик має вигляд [9, 14]:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{ij}(\tau) = (D_T + A_{MK}) \sigma^{ij} + (D_T c_{\Pi} + A_{MK} \gamma_1) p_{\Pi} \delta^{ij} + (D_T c_P + A_{MK} \gamma_2) p_P \delta^{ij} + \\ + \int_0^{\tau} \left( (D_T K(t, \tau) + A_{MK} K_{\Phi}(t, \tau)) \sigma^{ij} + (D_T K(t, \tau) c_{\Pi} + \right. \\ \left. + A_{MK} K_{\Phi}(t, \tau) \gamma_1) p_{\Pi} \delta^{ij} + (D_T K(t, \tau) c_P + A_{MK} K_{\Phi}(t, \tau) \gamma_2) p_P \delta^{ij} \right) dt - \beta \varepsilon_T^{ij}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут введено позначення:

$$D_T = \Pi / c_T; A_{MK} = \Pi_{\Phi} / (1 - c_{MK}); \gamma_1 = c_{MK} (c_{MK}^P - c_K^P) + c_K^P; \gamma_2 = c_{MK} (c_{MK}^{\Pi} - c_K^{\Pi}) + c_K^{\Pi},$$

де:  $\Pi$  – тензор миттєвих податливостей, який визначається за допомогою тензора  $C$ ;  $\Pi_{\Phi}$  – фіктивний тензор податливості, що визначається за допомогою тензора пружності  $C_{\Phi}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт тензора всихання;  $c_{MK}$  – об'ємний вміст пор у деревині.  $c_K$  – об'ємний вміст пор у клітинних стінках;  $c_{MK}^P$ ,  $c_{MK}^{\Pi}$ ,  $c_K^P$ ,  $c_K^{\Pi}$  – об'ємний вміст рідкої і пароповітряної фаз у матеріалах і капілярах.

Функції реологічної поведінки деревини вибирають у вигляді

$$K(t, \tau) = d_0 + \sum_{n=1}^N d_{ij} \exp\left(\frac{-\beta_{ij}(t - \tau)}{\tau_P}\right), \quad (4)$$

де коефіцієнти  $d_0$ ,  $d_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  і час релаксації  $\tau_P$  визначають шляхом апроксимації відомих експериментальних даних деформацій повзучості.

Математичні моделі для визначення концентрації рідини, пари, повітря і пароповітряної суміші у деревній пластині запропоновано у вигляді диференціальних рівнянь вологопровідності з граничними умовами, характерними для першого та другого періодів процесу сушіння [6, 12]. ґрунтуючись на розв'язках диференціальних рівнянь вологоперенесення, а також рівняннях стану газової фази і законі Дальтона, з урахуванням частки вільного від рідини об'єму матеріалу, отримано закономірності розподілу перенесення вологості, тепла та концентрації парогазової суміші у деревній пластині [14].

Прийнято допущення про те, що тиск водяної пари на поверхні деревини визначають з урахуванням середньої вологості сушіння матеріалу та рівноважної вологості повітря, а тиск водяної пари у середині деревини дорівнює тиску насиченої пари, що залежить від температури. Загальний тиск пароповітряної суміші у деревині визначають за законом Дальтона, а на поверхні матеріалу він дорівнює атмосферному. Моделювання впливу вологоперенесення на процес теплоперенесення здійснюють з урахуванням внутрішнього джерела у рівнянні теплоперенесення, яке описує потік випаровуючої вологи у деревині.

**Аналіз результатів чисельного моделювання.** Для чисельного дослідження процесів тепловологоперенесення і деформування деревини використано такі параметри зовнішнього середовища і тепловологообміну: для  $U > 0,35$ ,  $t_c = 79$  °C,  $\varphi = 0,77$ , коефіцієнт теплообміну  $\alpha = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), коефіцієнт вологообміну  $\beta = 2 \cdot 10^{-6}$  м/с; для  $U = 0,35 \div 0,25$ , відповідно  $t_c = 84$  °C,  $\varphi = 0,62$ ,

$\alpha = 22.5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ,  $\beta = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ ; для  $U < 0,25$ , відповідно  $tc = 102 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 0,27$ ,  $\alpha = 22 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ,  $\beta = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ . Значення фізичних параметрів: для повітряної та парогазової фази:  $c_0 = 9,05 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\alpha_{II} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ;  $\epsilon_{II} = 284 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $R_{III} = 8,3144 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ ;  $\epsilon_{III} = 461,9 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda_{III} = 0,0248 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $c_{III} = 2,034 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ; для рідкої фази:  $\rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_p = 0,648 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $c_p = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\alpha_p = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ; для твердої фази:  $\rho_T = 1540 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_T = 0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $c_T = 3,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\alpha_T = 1,66 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

Теплофізичні параметри деревини у процесі сушіння визначаються за апроксимаційними залежностями [1, 2, 6, 13] від вологості і температури. Формули для їх визначення наведено у [12]. Але для деяких параметрів необхідні уточнення. Зокрема, коефіцієнти вологопровідності деревини за даними [1] залежать тільки від температури. Дані досліджень [3, 13] свідчать про істотну залежність  $a_m$  від вологості. Тому для визначення залежності  $a_m$  як функції  $a_m(U, t)$  використано результати експериментальних досліджень [3, 13]. Отримані залежності  $a_m(t)$  мають вигляд

$$a_m(t) = (a_{1t^3} + a_{2t^2} + a_{3t} + a_{0}) \cdot 10^{-10}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

де коефіцієнти моделі для різних порід наведено у таблиці. На основі оброблення експериментальних даних [2, 4, 11] отримано залежність коефіцієнта вологопровідності деревини від вологості для сталої температури:

$$a_m(U) = -274,391u^5 + 634,908u^4 - 526,7u^3 + 181,864u^2 - 22,655u + 1,905. \quad (6)$$

Тоді для розрахунків прийнято, що:

$$a_m = a_{mi} \cdot a_{mi}; \quad a_{m \text{ рад}} / a_{m \text{ тан}} = 1,25.$$

Табл. Значення коефіцієнтів моделі для різних порід деревини

Дерева порода	$a_{t1}$	$a_{t2}$	$a_{t3}$	$a_{t4}$
Сосна	$1,273 \cdot 10^{-5}$	$9,74 \cdot 10^{-4}$	0,022	0,587
Листяні	$8,565 \cdot 10^{-5}$	$-2,361 \cdot 10^{-3}$	0,111	0,192
Дуб	$8,565 \cdot 10^{-5}$	$-5,704 \cdot 10^{-4}$	0,041	0,012

Для визначення коефіцієнта вологообміну використовують залежність за відомою номограму [2]. Її аналіз свідчить про незалежність коефіцієнта вологообміну від породи деревини та вологості матеріалу, але він залежить від відносної вологості агента сушіння. Аналіз номограми свідчить про досягнення коефіцієнтом вологообміну однакових значень для  $\phi = 0,1$  і  $\phi = 0,75$  для швидкості повітря 2 м/с. Наявні при цьому різні значення рівноважної вологості зумовлюють певну неоднозначність. Тому для визначення коефіцієнта вологообміну використано формулу [5]:

$$\alpha_m = 0,95 \left( \frac{T}{(P/P_a)\phi\epsilon} \right) \cdot 10^{-9}, \quad (7)$$

де:  $\epsilon$  – критерій фазового переходу,  $T$  – абсолютна температура середовища, К.

Відомо [2, 3], що у капілярах деревини знижується відносний тиск пари. Згідно з формулою Томсона тиск пари у капілярах визначають за такою формулою:

$$P = P_0 \exp(-2\sigma V_p / rTR), \text{ Па}, \quad (8)$$

де:  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини, Н/м,  $V_p$  – молярний об'єм рідини, м<sup>3</sup>/моль. Тоді величина зниження тиску пари  $P$ , а отже, і відносної вологості  $\phi$  становить

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-2\sigma V_p / rTR). \quad (9)$$

Величину  $r$  визначають за залежністю  $r = r(U)$ , яку отримано на основі моделювання структури деревини системою непостійних капілярів, сукупністю циліндрів радіуса  $r$ , який залежить від вологості.

На рис. 1 наведено значення величини  $P/P_0$  залежно від зміни температури і вологості у гігроскопічній області.

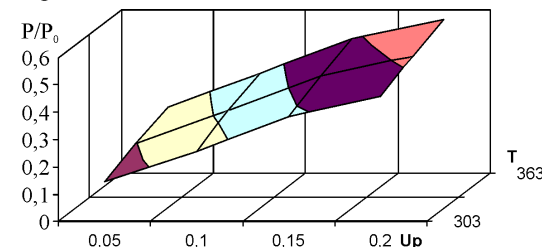


Рис. 1. Залежність величини  $P/P_0$  від температури і вологості

Значення  $\phi$  отримують шляхом логарифмування величини  $Wp$ . Отримаємо таку формулу:

$$\phi = 0,42 \ln \frac{100U_p}{7,36 - 0,015T}. \quad (10)$$

На рис. 2 показано зміну об'ємного вмісту фаз деревини сосни залежно від вологості, а рис. 3 характеризує зміну в часі об'ємного вмісту рідкої фази. Треба зазначити, що відмінність розподілу температурних полів з плином тривалості сушіння деревини посилюється, а саме температура твердої фази зростає, а підвищення температури рідкої фази сповільнюється, і вона не перевищує температури насиченої пари.

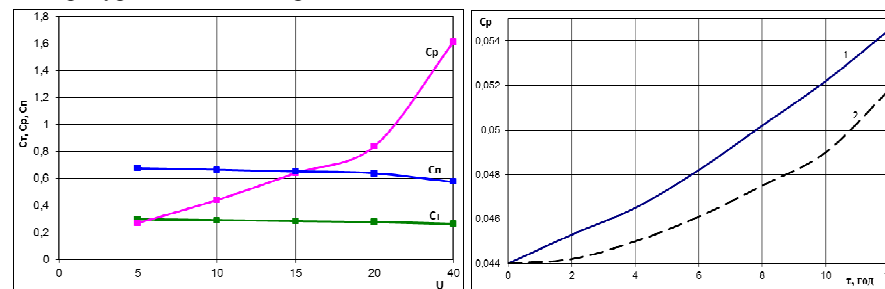


Рис. 2. Розрахункові значення об'ємного вмісту фаз для деревини сосни

Рис. 3. Зміна у часі об'ємного вмісту рідкої фази (1 – на поверхні, 2 – у деревині)

Результати аналізу графічних залежностей розподілу вологовмісту і температури у деревній пластині (рис. 4,а та 4,б) свідчать про те, що, незважаючи на більші значення температури у твердій фазі порівняно з рідкою, інтенсивність досягнення рівномірних значень у процесі сушіння у рідкій фазі є вищою, ніж у твердій. Такий взаємопротилежний розподіл значень вологовмісту і температури та швидкості їх зміни у різних фазах зумовлений вищою теплопровідністю води порівняно зі зовнішнім теплообміном твердої фази. Графічні залежності нерівномірного розподілу вологості особливо зумовлені фазовими переходами між рідкою і пароповітряною фазами. Проте на початкових етапах перехідного процесу інтенсивна зміна температури і вологості для усіх фаз спостерігається на поверхні матеріалу. Потрібно зазначити, що відмінність розподілу температурних полів з плином тривалості сушіння деревини посилюється, а саме температура твердої фази зростає, а підвищення температури рідкої фази заповільнюється і не перевищує температури насиченої пари.

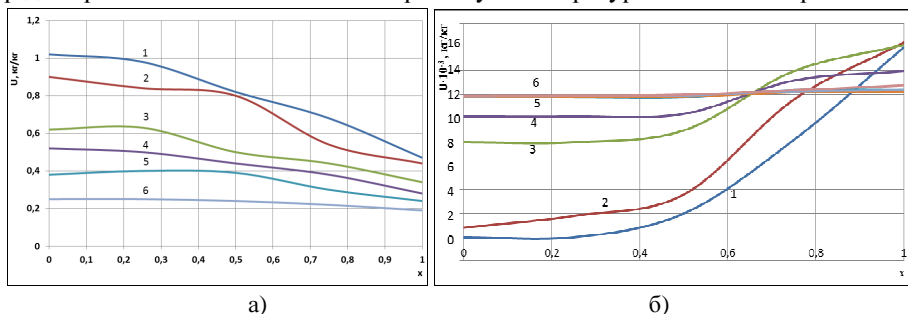


Рис. 4. Розподіл вологовмісту твердої (а) та пароповітряної (б) фази у деревній пластині для різних значень часу (крива 1 – 10 год; 2 – 20 год; 3 – 30 год; 4 – 40 год; 5 – 50 год; 6 – 60 год)

Температура у газовій фазі досягає значень, які на порядок вищі, ніж в інших фазах. Крім цього, інтенсивність зміни парогазової та рідкої фаз істотно змінюється у процесі зневоднення деревини. Спостерігається значний вплив структурної анізотропії деревини на ці процеси. На початковій стадії процесу для взірців пиломатеріалів радіального напрямку значення парогазової суміші збільшується від центральної частини до поверхні. Для тангенціальних взірців розподіл парогазової суміші є більш рівномірним. Інтенсивність фазових переходів навіть для початкових етапів зневоднення деревини неоднакова у різних точках деревини й істотно залежить від тиску парогазової суміші.

На рис. 5,а зображено зміну у часі об'ємного вмісту рідкої фази у деревній пластині, а рис. 5,б описує розподіл концентрації повітря залежно від зміни часу. Результати здійсненого математичного моделювання узгоджуються з результатами експериментальних досліджень та даними щодо розподілу температури і вологості в гомогенному середовищі для часткових випадків. Зокрема, модельні значення температури твердої фази є близькими до виміряної температури поверхні, а температура рідкої фази більше відповідає температурі в центрі деревної пластини за відомими експериментальними даними. Початковий нерівномірний розподіл вологості істотно впливає на розподіл вологості у

деревині внаслідок випаровування рідини і зникнення парової фази. У процесі зневоднення деревини спостерігається зменшення зони формування максимальних значень тиску парогазової суміші, а самі значення знижуються.

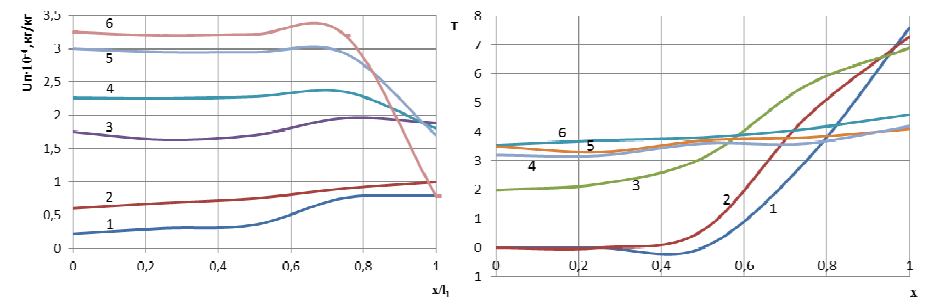


Рис. 5. Розподіл вологовмісту рідкої фази (а) та концентрації повітря (б) у деревній пластині для різних значень часу (крива 1 – 10 год; 2 – 20 год; 3 – 30 год; 4 – 40 год; 5 – 50 год; 6 – 60 год)

Результати аналізу розподілу температури і перенесення вологи у рідкій, твердій і повітряній фазах свідчать про те, що математичні моделі дають змогу прогнозувати особливості взаємопов'язаних процесів перенесення у різних фазах і враховувати фізичну нелінійність цих процесів, зумовлену залежністю фізичних властивостей деревини від температури і вологості.

Визначальною причиною виникнення у деревині внутрішнього тиску та його градієнтів є процес інтенсивного розширення парогазової суміші у матеріалі, зумовлений нагріванням та неоднорідністю капілярно-пористої структури. Підвищення температури матеріалу інтенсифікує внутрішній процес пароутворення та молярне перенесення вологи до поверхні матеріалу.

Результати аналізу графічних залежностей свідчать про те, що для процесу сушіння деревини ( $\rho_0 = 460 \text{ кг/м}^3$ ) з початковою вологістю  $U_0 = 0,6 \text{ кг/кг}$  характерні три періоди: період прогрівання, період сталої швидкості сушіння і період спадаючої швидкості сушіння. У першому періоді деревина інтенсивно прогривається, що зумовлює швидке пароутворення. Температура поверхневих шарів деревини впродовж усього періоду є більшою, ніж у центральних шарах. У найбільш нагрітих шарах деревини до кінця першого періоду процесу сушіння виникає максимальний залишковий тиск. Цей тиск виникає для температури матеріалу, що є нижчою від температури насичення для заданого атмосферного тиску.

Другий період процесу сушіння характеризується відносною стабілізацією росту температурного поля. Це зумовлено поглинанням значної кількості тепла процесом внутрішнього пароутворення, яке зумовлює швидкий ріст залишкового внутрішнього тиску. Наявність градієнта такого тиску у внутрішніх шарах деревини, інтенсифікує процес виділення вологи. На початку періоду сталої швидкості сушіння спостерігається поєднання фронтів максимальних значень внутрішнього залишкового тиску. У середині цього періоду його значення досягають максимальних значень і після цього спостерігається їх поступове зменшення. Збільшення значень тиску в деревині у процесі сушіння зумовлюються у структурі матеріалу впродовж тривалого часу повітряної суміші.

Важливим аспектом є взаємодія температури і внутрішнього тиску (рис. 6, а,б). Оскільки температура деревини у процесі сушіння поступово зростає, то значення загального внутрішнього тиску у матеріалі є більшим за значення тиску насиченої пари для даної температури матеріалу. Тиск парогазової суміші має максимальні значення у центральній зоні деревної пластини. Така залежність між температурою деревини і внутрішнім тиском є ще одним підтвердженням того, що у процесі сушіння деревини здійснюється інтенсивне внутрішнє пароутворення або випаровування вологи.

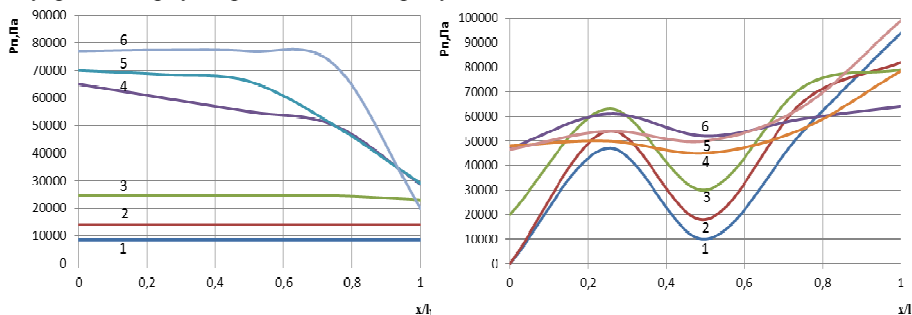


Рис. 6. Розподіл тиску пари (а) та повітря (б) у деревній пластині для різних значень часу (крива 1 – 10 год; 2 – 20 год; 3 – 30 год; 4 – 40 год; 5 – 50 год; 6 – 60 год)

Аналіз температурних полів для періоду спадаючої швидкості сушіння свідчить про їх зростання у всьому об'ємі матеріалу доти, поки температура центрального шару не зрівняється з температурою поверхневих шарів. Оскільки для цього періоду характерне виділення зв'язаної вологи, то тривалість цього періоду є досить значною. Однак інтенсивність спадання внутрішнього залишкового тиску є більшою порівняно з попередніми періодами.

Капілярно-пористе середовище деревини у процесі сушіння, окрім вологи, заповнюється і пароповітряною сумішшю. У процесі нагрівання деревини рідина (вода), а також пара і повітря намагаються збільшити свій об'єм. Однак зміна об'єму деревинної та рідкої фаз деревини зі збільшенням температури є незначною порівняно зі збільшенням об'єму пароповітряної суміші. Ця обставина, а також наявність пари і повітря у деревині впродовж усього процесу сушіння, зумовлюють наявність залишкового тиску у матеріалі, підвищення температури та зменшення вологості деревини у процесі сушіння, збільшення газопроникливості у матеріалі. Тобто кількість пароповітряної суміші змінюється у процесі сушіння. Оскільки у процесі сушіння впродовж тривалого періоду зберігається повітря, то це зумовлює зменшення тиску у матеріалі, величина якого є більшою за тиск водяної пари за заданої температури.

**Висновки.** Розв'язано важливу для процесу сушіння задачу визначення в'язкопружного деформування деревини як трифазної системи з урахуванням анізотропії тепломеханічних характеристик. Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів сушіння на процеси в'язкопружного деформування і тепломасоперенесення у твердій, рідкій і паровій фазах для деревини. Зокрема, встановлено різні значення температури рідкої і твердої фаз, різні інтен-

сивності процесів перенесення у фазах обґрунтують необхідність застосування багатофазних моделей для моделювання процесів сушіння.

У процесі сушіння з підвищенням температури і зменшенням вологості тиск парогазової суміші досягає максимальних значень. Збільшення температури агента сушіння інтенсифікує динаміку тиску парогазової суміші у деревині. Його значення стають максимальними для найбільшої та найменшої концентрації відповідно твердої та рідкої фаз.

Аналіз залежностей розподілу вологовмісту і температури у деревній пластині свідчить про те, що, незважаючи на більші значення температури у твердій фазі порівняно з рідиною, інтенсивність досягнення рівномірних значень у процесі сушіння у рідкій фазі є вищою, ніж у твердій. Такий взаєморозподіл значень вологовмісту і температури та швидкості їх зміни у різних фазах зумовлюється вищою температуропровідністю води порівняно із зовнішнім теплообміном твердої фази.

### Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплового оброблення і сушіння деревини : монографія / П.В. Білей. – Коломия : Вид-во "Вік", 2005. – 364 с.
2. Богданов В.С. Справочник по сушке древесины / В.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтуш. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1990. – 304 с.
3. Боровиков А.Н. Справочник по древесине / А.Н. Боровиков, Б.Н. Уголев. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1989. – 296 с.
4. Вінтонів І.С. Деревиназнавство : навч. посібн. / І.С. Вінтонів, І.М. Сопушинський, А. Тайшінгер. – Львів : Вид-во "Апріорі", 2007. – 312 с.
5. Гороховский А.Г. Повышение эффективности управления процессом сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский. – Екатеринбург : Изд-во УГЛТУ, 2008. – 128 с.
6. Кречетов И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1980. – 432 с.
7. Соколовський Я.І. Математичне моделювання двовимірного в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння / Я.І. Соколовський, М.В. Дендок // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – Львів : Вид-во "Світ". – 2008. – Вип. 7. – С. 17-26.
8. Соколовський Я.І. Математичне моделювання в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння як багатофазної системи / Я.І. Соколовський, В.І. Криштапович, О.В. Мокрицька // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.4. – С. 298-309.
9. Соколовський Я.І. Чисельне моделювання в'язкопружного деформування капілярно-пористого матеріалу / Я.І. Соколовський, О.В. Мокрицька // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2011. – № 719. – С. 184-190.
10. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Серговский. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1981. – 304 с.
11. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения : учебник [для студ. ВУЗов лесотехн. спец.] / Б.Н. Уголев; М-во образования Рос. Федерации, Моск. гос. ун-т леса. – Изд. 3-е, [перераб. и доп.]. – М. : Изд-во МГУЛ, 2002. – 340 с.
12. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1990. – 336 с.
13. John F. Sian. Wood: influence of moisture on physical properties / John F. Sian. – Virginia, 1995. – 227 p.
14. Mokrytska O. Mathematical simulation of deformational and relaxation process in capillary-porous materials / O. Mokrytska, Ya. Sokolowsky // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : міжвідомч. наук.-техн. зб. – Львів : Вид-во НЛТУ України. – 2010. – Вип. 36. – С. 116-124.
15. Perre P. A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions / P. Perre, J. Passard // Drying Technology. – 2004. – Vol. 22, No. 1-2. – Pp. 27-44.

**Криштанович В.И., Мокрицкая О.В. Исследование тепломассопереноса в процессе сушки древесины как многофазной структуры**

Приведена математическая модель реологического поведения древесины как трехфазной среды, состоящей из твердой (древесного вещества), жидкой и паровоздушной фаз, с учетом анизотропии тепломеханических характеристик. На основе разработанных математических моделей и прикладных программных средств исследована динамика изменения температуры, влагосодержания, концентрации жидкости, пара и паровоздушной смеси и вязкоупругого деформирования древесины в процессе сушки. Установлены закономерности влияния технологических факторов конвективного процесса сушки на процессы тепломассопереноса древесины различных фаз.

**Ключевые слова:** математическая модель, вязкоупругое деформирование, тепломассоперенос, многофазная система, древесина, сушка древесины.

**Kryshchapovich V.I., Mokrytska O.V. The Study of Heat and Mass Transfer in the Drying of Wood as Multiphase Structure**

A mathematical model of rheological behaviour of wood as a three-phase medium consisting of solid (woody matter), liquid and vapour phases taking into account the thermal anisotropy of mechanical properties, is presented. Based on the developed mathematical models and software applications dynamics of changes in temperature, moisture content, concentration of liquid, steam and vapour-air mixture and viscoelastic deformation of wood in the drying process. The regularities of technological factors of convective drying process for heat and mass transfer processes of wood of different phases are defined.

**Keywords:** mathematical model, viscoelastic deformation, heat and mass transfer, multiphase systems, wood timber.

**УДК 614.841**    *Доц. О.В. Лазаренко, канд. техн. наук; курсант Т.Я. Боднарчук; доц. В.Б. Лойк, канд. техн. наук; слухач С.В. Гарник – Львівський ДУ безпеки життєдіяльності*

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕЗАХИСТУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВЕРМИКУЛІТО-СИЛІКАТНИМИ ПЛИТАМИ**

Запропоновано використання вермикуліто-силікатних плит для підвищення вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. На основі проведеного експерименту виявлено, що вермикуліто-силікатні плити є негорючими. Оцінено вогнезахисний ефект вермикуліто-силікатних плит завдяки хімічним процесам, які відбуваються у вермикуліті. Проаналізовано вогнезахисний ефект з визначенням вогнестійкості внаслідок впливу стандартного температурного режиму пожежі. Експериментально визначено вогнестійкість плити за втратою теплоізоляційної здатності, а також процеси та фазові перетворення, які відбуваються у вермикуліто-силікатній плиті під час нагрівання.

**Ключові слова:** вермикуліто-силікатні плити, вогнестійкість, вогнезахисний ефект, фазові перетворення, металеві будівельні конструкції, група горючості.

**Вступ.** У будівництві існує тенденція у зведення будівель і споруд, які потребують застосування нових технологій для економії будівельних матеріалів (цегли, дерева, залізобетону), та зменшення навантаження на фундаменти і конструкції каркасів і впровадження технологій підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій. Тому виникає потреба у створенні нових видів конструкційно-оздоблювальних виробів, здатних забезпечити стабільність експлуатаційних властивостей у широкому інтервалі температур, високу есте-

тичність та екологічну безпеку. Одним із способів підвищення вогнестійкості є захист вогнестійкими вермикуліто-силікатними плитами.

До найпоширеніших матеріалів, що використовують у будівництві, належить метал, що має високу міцність, стійкість до механічних напружень, технологічність, але і має певні недоліки, а особливо, високу теплопровідність. Це призводить до того, що в умовах пожежі швидко прогрівається до температури, що перевищує 400-500 °С, внаслідок навантаження в металевих конструкціях розвиваються температурні деформації [1, 2]. Межа вогнестійкості незахищених металевих конструкцій становить REI 10-15.

**Постановка проблеми.** Для підвищення вогнестійкості металевих несних конструкцій використовують вогнезахисні екрани. Основною вимогою до цих екранів є здатність витримувати високі температури та забезпечити непродихність теплової дії негативних факторів на поверхню матеріалу, який захищається для підвищення межі вогнестійкості.

Одним із ефективних способів підвищення вогнестійкості металевих конструкцій є нанесення вогнезахисних покриттів та облицювань, які поділяють на пасивні та реактивні вогнезахисні покриття [3]. На сьогодні є дуже широкий асортимент вогнезахисних покриттів, що впливає на вибір оптимального вогнезахисного покриття.

**Мета роботи** – проведення експериментальних досліджень із визначення групи горючості та вогнезахисного ефекту ВСП для металевих будівельних конструкцій, як обґрунтування підвищення їх вогнестійкості.

**Методики проведення досліджень.** Згідно з [4], суть методу випробувань експериментального визначення негорючих твердих речовин і матеріалів полягає у впливі на зразок, розташований у печі, із заданими параметрами (температура становить 750<sup>±50</sup>°С).

Для проведення випробування підготовлено два фрагменти вермикуліто-силікатної плити таких розмірів: висота 50 мм, діаметр 45 мм. Під час проведення експериментальних досліджень реєстрували температуру в печі, у центрі і на поверхні зразка до досягнення температурного балансу трьох термопар, фіксували його тривалість та втрату маси зразка.

Згідно з [5], випробування полягає у нагріві за стандартним температурним режимом дослідних фрагментів, до настання нормованих станів для цієї конструкції з вогнестійкості. Для проведення випробування виготовлено два фрагменти дослідного зразка конструкції. Зразок, який потрібно захистити – листову сталь Ст-5 товщиною 5 мм, як вогнезахисний шар використано ВСП товщиною 20 мм зі загальними розмірами конструкції 220×160×24 мм (рис. 1).

Перед проведенням випробування фрагменти кондиціонують у термошафі, яка вентильована за температури 60<sup>±5</sup> °С протягом 24 год. Вогневе випробування фрагментів здійснено в електропечі СНОЛ-1,6.2,0.0,8/9-М1 УХЛ4,2 [6]. Для фіксування температури під час експериментальних досліджень підібрано комплект ТХА довжиною 1-1,5 м з ізоляцією із керамічного намиста. Термопари в печі та термопари у дослідному зразку під'єднали до регулятора-вимірювача РТ 0102-8-К [6], які під'єднали до персонального комп'ютера.