

УДК 681.62:539.3

Сасс Т., Коляно Я.

Українська академія друкарства

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ ТЕПЛОВОЛОГОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ДЕРЕВА І КАРТОНУ

Використовуючи рівняння, виведені Ликовим А.В., на основі дослідження нестационарної задачі термовологопровідності пропонується підхід до вивчення в часі конвективного сушіння поліграфічних матеріалів та напівфабрикатів. Отримані у роботі формули дозволяють будувати графіки розподілу температури і вологовмісту залежно від часу в процесі конвективного сушіння вологої пластини, виготовленої з будь-якого капілярно-пористого колоїдного матеріалу. В якості досліджуваних матеріалів вибрано дерево і картон. Із запропонованих графіків видно, що піл час розгляданого процесу виникають градієнти температури та вологовмісту, які можуть призвести до псування висушеного матеріалу. Розглянута задача корисна і для вивчення процесу сушіння, коли підвід тепла здійснюється комбінованими способами (кондуктивно-конвективним, променево-конвективним) з метою подальшої автоматизації. Запропонована математична модель може бути застосована до вивчення інших способів сушіння поліграфічної продукції (кондуктивного, променевого).

Конвективне сушіння, матеріал, деревина, картон.

1. ВСТУП

Конвективний підвід тепла широко застосовується при сушінні капілярно-пористих колоїдних тіл (дерево, картон, папір, целюлоза та ін.). Так важливе значення процес сушіння має у деревообробній промисловості, де за різними даними з усього сушильного обладнання, що використовується в Україні, 90–95% становлять сушарки конвективного типу [1]. Цей спосіб сушіння застосовується при виробництві пиломатеріалів, деревостружкових та деревоволокнистих плит, шпону, меблів тощо [15]. Проблема сушіння деревини повністю нерозв'язана. Стан деревини, як і будь-якого вологого матеріалу, визначається його температурою і вологістю. Якісно висушені вироби із деревини з врахуванням умов експлуатації можуть служити 50–100 і більше років. Сушіння деревини дає значний економічний і екологічний ефект [2].

Деревина є типовим колоїдним капілярно-пористим тілом з обмеженою здатністю до набухання і за своїми властивостями близька до целюлози – основного матеріалу для виготовлення паперу і картону [8, 11]. Конвективний спосіб сушіння широко використовується і у поліграфічному виробництві [3-4, 6, 8 12, 14, 16-18]. Наприклад, при виробництві: паперу, картону [6], палітурних кришок [18, 14, 8], обкладинок [17], лакованих чи ламінованих друкованих відбитків [4, 8, 16], сучасних пакувальних матеріалів [4, 17] та ін.

2. ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ.

Фізична постановка задачі: розглядається волога необмежена пластина (плита) товщиною $2h$, верхня і нижня поверхні якої взаємодіють із оточуючим середовищем згідно із законом Ньютона (конвективний термовологообмін) (див. рис. 1). Нагрів (висушування) пластини здійснюється за допомогою температури оточуючого середовища T_c . Потрібно знайти розподіл температури і вологовмісту в довільній точці пластини залежно від часу.

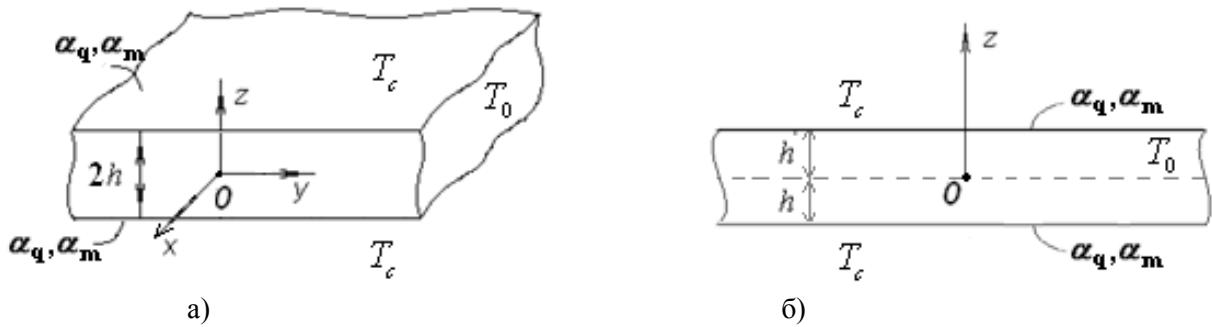


Рис. 1. Схема перерізу пластини, що конвективно підігрівається теплим повітрям:
а) тривимірна; б) двовимірна

Математична постановка і розв'язок цієї задачі в розмірному і безрозмірному вигляді записані у роботі [10]. Безрозмірний вигляд розв'язку цієї задачі наступний [10]:

$$T(Z, Fo) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{ni} \cos(v_i \mu_n Z) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (1)$$

$$\Theta(Z, Fo) = 1 + \frac{1}{Ko^*} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{ni} (1 - v_i^2) \cos(v_i \mu_n Z) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (2)$$

$$\text{де } C_{n1} = 2 \frac{(1 - \varepsilon Ko K_1) P_{n2} + \varepsilon Ko Q_{n2}}{\mu_n \Psi_n}, \quad Ko^* = \varepsilon Ko,$$

$$C_{n2} = -2 \frac{(1 - \varepsilon Ko K_1) P_{n1} + \varepsilon Ko Q_{n1}}{\mu_n \Psi_n}, \quad K_1 = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} Lu \frac{Bi_m}{Bi_q},$$

$$\Psi_n = v_1 A_{n1} P_{n2} + v_2 B_{n2} Q_{n1} - v_2 A_{n2} P_{n1} - v_1 B_{n1} Q_{n2},$$

$$A_{ni} = \left[1 + \frac{1}{Bi_q} + (1 - v_i^2) K_1 \right] \sin v_i \mu_n + \frac{1}{Bi_q} v_i \mu_n \cos v_i \mu_n,$$

$$B_{ni} = (1 - v_i^2) \sin v_i \mu_n + \frac{(1 - v_i^2) + \varepsilon Ko Pn}{Bi_m} (\sin v_i \mu_n + v_i \mu_n \cos v_i \mu_n),$$

$$Q_{ni} = \left[1 + (1 - v_i^2) K_1 \right] \cos v_i \mu_n - \frac{1}{Bi_q} v_i \mu_n \sin v_i \mu_n,$$

$$P_{ni} = (1 - v_i^2) \cos v_i \mu_n - \frac{(1 - v_i^2) + \varepsilon Ko Pn}{Bi_m} v_i \mu_n \sin v_i \mu_n. \quad \mu_n - \text{корені певного характеристичного}$$

$$\text{рівняння; } T = \frac{t - T_0}{T_c - T_0}, \quad \Theta = \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 - \theta_p}, \quad Z = \frac{z}{h}, \quad Fo = \frac{a_q \tau}{h^2}, \quad Bi_q = \frac{\alpha_q h}{\lambda_q}, \quad Bi_m = \frac{\alpha_m h}{\lambda_m} = \frac{\beta h}{a_m}, \quad Lu = \frac{a_m}{a_q},$$

$$Ko = \frac{r(U_0 - U_p)}{c_q(T_c - T_0)}, \quad Pn = \frac{\delta(T_c - T_0)}{U_0 - U_p}, \quad \varepsilon - \text{критерій фазового перетворення; } a_q, a_m - \text{коєфіцієнти}$$

температуропроводності і потенціалопроводності вологопереносу, α_q, α_m – коєфіцієнти теплообміну і вологообміну, λ_q, λ_m – коєфіцієнти теплопровідності і вологопровідності, δ – термоградієнтний коєфіцієнт, c_q – теплоємність матеріалу, r – питома теплота фазового

переходу, T_0, T_c – початкова температура пластини і температура оточуючого середовища, θ_0, θ_p – початкове і рівноважне значення потенціалу вологопереносу, U_0, U_p – початковий і рівноважний вологовміст пластини [13]. Зв'язок потенціалу вологопереносу і вологовмісту

задається співвідношенням $\theta = \frac{U}{U_{MG}} 100$, де U – вологовміст матеріалу, U_{MG} – максимальний гіроскопічний вологовміст матеріалу [12].

Для обрахунків розв'язок (1), (2) перепишемо у розмірному вигляді:

$$t(z, \tau) = T_c - (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{ni} \cos\left(v_i \mu_n \frac{z}{h}\right) e^{-\mu_n^2 a_q \tau / h^2}, \quad (3)$$

$$\theta(z, \tau) = \theta_p - \frac{(\theta_0 - \theta_p)}{Ko^*} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 C_{ni} (1 - v_i^2) \cos\left(v_i \mu_n \frac{z}{h}\right) e^{-\mu_n^2 a_q \tau / h^2}, \quad (4)$$

де t , θ – розмірні температура та потенціал вологопереносу, τ – розмірний час.

3. ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Чисельні обрахунки проводимо за допомогою формул (3), (4) на мові Fortran і з одержаних графіків хочемо визначити: 1) поведінку температури і вологовмісту у різних точках пластини залежно від часу і, в результаті, вихід температури і вологовмісту на стаціонарне (стале) і рівноважне значення відповідно; 2) виникнення і поведінку в часі градієнтів температури і вологовмісту. Параметри приймалися для сосни: $\delta = 0,235 \cdot 10^{-2} 1/^\circ C$, $\beta = 1,35 \cdot 10^{-5} м/с$ [12], $\lambda_q = 0,15 Вм/(м^\circ C)$, $c_q = 2,72 кДж/(кг^\circ C)$, $a_q = 1,53 \cdot 10^{-7} м^2/с$ [7], $\alpha_q = 12,6 Вм/(м^2^\circ C)$, $a_m = 1,377 \cdot 10^{-7} м^2/с$ [1], $T_0 = 10^\circ C$, $T_c = 100^\circ C$, $U_0 = 0,37 кг/кг (\theta_0 = 281^\circ B)$, $U_p = 0,15 кг/кг (\theta_0 = 114^\circ B)$, $h = 25,5 мм$; для дубу: $\delta = 0,26 \cdot 10^{-2} 1/^\circ C$, $\beta = 4,4 \cdot 10^{-6} м/с$ [12], $\lambda_q = 0,2 Вм/(м^\circ C)$, $c_q = 2,4 кДж/(кг^\circ C)$, $a_q = 1 \cdot 10^{-7} м^2/с$ [7], $\alpha_q = 13,6 Вм/(м^2^\circ C)$, $a_m = 0,8 \cdot 10^{-7} м^2/с$ [1], $T_0 = 10^\circ C$, $T_c = 80^\circ C$, $U_0 = 0,5 кг/кг (\theta_0 = 200^\circ B)$, $U_p = 0,3 кг/кг (\theta_0 = 120^\circ B)$, $h = 27 мм$; для картону: $\delta = 0,25 \cdot 10^{-2} 1/^\circ C$, $\beta = 5 \cdot 10^{-6} м/с$, $\lambda_q = 0,14 Вм/(м^\circ C)$, $c_q = 1,51 кДж/(кг^\circ C)$, $a_q = 1,22 \cdot 10^{-7} м^2/с$ [7], $\alpha_q = 13 Вм/(м^2^\circ C)$, $a_m = 0,9 \cdot 10^{-7} м^2/с$, $T_0 = 10^\circ C$, $T_c = 80^\circ C$, $U_0 = 0,4 кг/кг (\theta_0 = 181^\circ B)$, $U_p = 0,15 кг/кг (\theta_p = 68^\circ B)$, $h = 10 мм$. Параметри ε , r однакові для всіх матеріалів: $\varepsilon = 0,05$ [11], $r = 2256 кДж/кг$ [5].

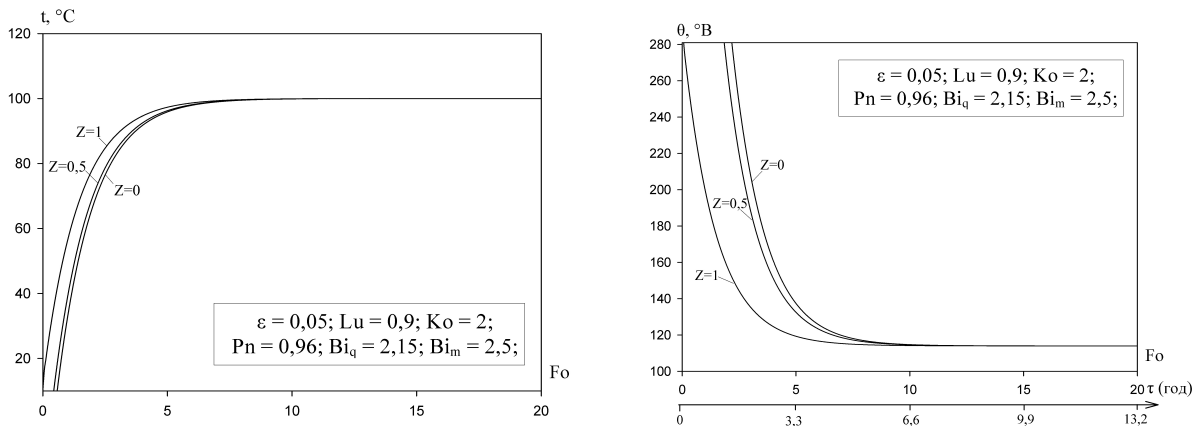


Рис. 2. Розподіл температури та потенціалу вологопереносу в часі при конвективному сушінні соснової плити товщини $2h=51$ мм

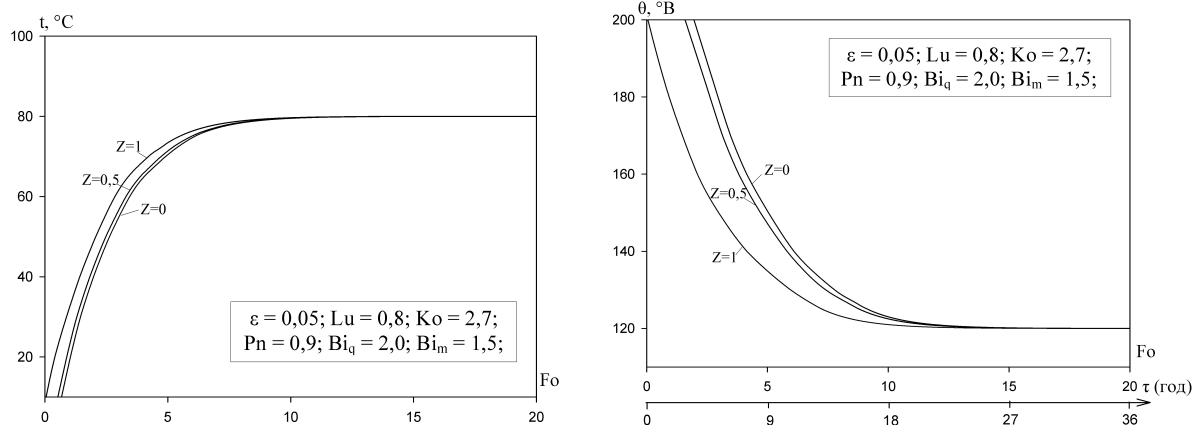


Рис. 3. Розподіл температури та потенціалу вологопереносу в часі при конвективному сушінні дубової плити товщини $2h=54$ мм

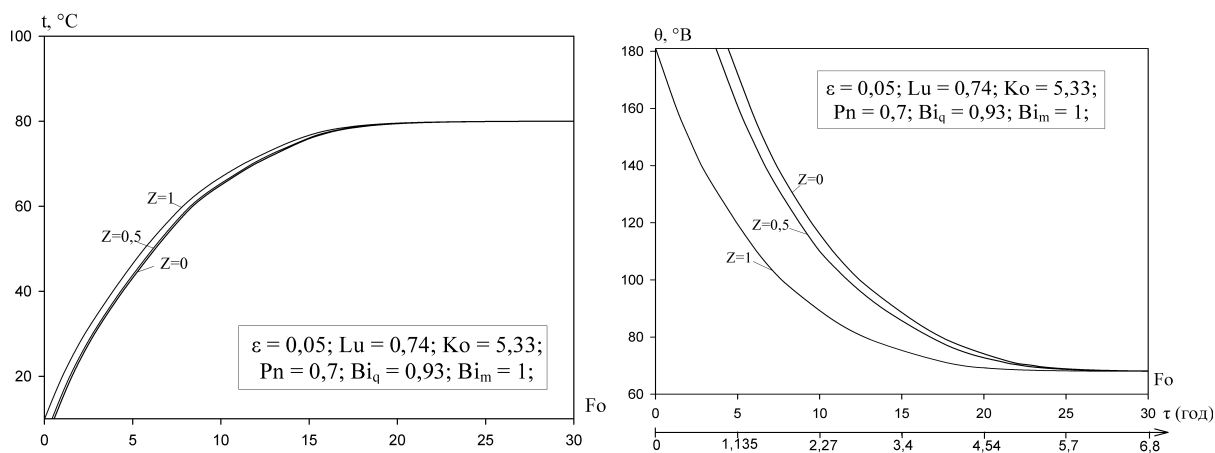


Рис. 4. Розподіл температури та потенціалу вологопереносу в часі при конвективному сушінні картонної плити товщини $2h=20$ мм:

На графіках рисунків 2–4 продемонстровано весь перехідний (нестационарний, несталый) процес висушування плит, виготовлених з різних матеріалів аж до стаціонарного (сталого) стану. Спостерігаємо за трьома поверхнями пластини: $Z=0$ – серединна поверхня, $Z=0,5$ – поверхня, рівновіддалена від верхньої та серединної, $Z=1$ – верхня (зовнішня) поверхня. Як бачимо із графіків поведінки температурного та вологопереносного потенціалів матеріалів відрізняється. Температура зовнішньої поверхні пластини ($Z=1$), порівняно із серединою пластини ($Z=0$), з самого початку процесу сушіння зростає швидше, що призводить до появи градієнтів температури і із запізненням в часі до градієнтів вологопереносу по товщині пластини. Температура соснової плити виходить на стаціонар через $\approx 4,5$ години; дубової – через ≈ 20 год., картонної – через $\approx 4,5$ год. Час виходу на рівноважний вологовміст дещо більший і становить: для сосни $\approx 6,6$ год., для дубу ≈ 25 год., для картону ≈ 6 год. Отримані графіки температури для сосни практично співпадають (з точністю до 10%) із відповідними графіками, отриманими експериментально [1, 19].

4. ВИСНОВКИ

1. Отримані у роботі ряди дозволяють будувати графіки розподілу температури і вологовмісту залежно від часу в процесі конвективного сушіння вологої пластини, виготовленої з будь-якого капілярно-пористого колоїдного матеріалу (наприклад: дерева, картону, паперу, целюлози та ін.).

2. Із запропонованих у роботі графіків видно, що під час розглядуваного процесу конвективного сушіння виникають градієнти температури та вологовмісту, які можуть призвести до псування висушуваного матеріалу (наприклад, жолоблення). Правильно підібраний режим сушіння може навіть покращити властивості висушуваного матеріалу [12, 2].

3. Розглянута задача корисна для вивчення процесу сушіння поліграфічної продукції, коли підвід тепла здійснюється конвективним чи комбінованими способами (кондуктивно-конвективним, променево-конвективним) з метою подальшої автоматизації. Запропонований підхід для розв'язання цієї задачі (запропонована математична модель) може бути застосований до вивчення інших способів сушіння поліграфічної продукції: кондуктивного (контактного) [9], променевого (терморадіаційного).

1. Бакалець А. В. Математичне моделювання неізотермічного вологоперенесення і в'язкопружного стану в деревині у процесі сушіння [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02 / Антон Васильович Бакалець. – Львів, 2010. – 240 с.

2. Білей П. В. Сушіння і захист деревини / П. В. Білей, В. М. Павлюст. – Львів: 2008. – 312 с.

3. Воробьев Д. В. Технология послепечатных процессов [Текст] / Д. В. Воробьев – М.: МГУП, 2000. – 392 с.

4. Гавенко С. Ф. Технология ламінування друкарських відбитків [Текст] / С. Ф. Гавенко, М. С. Мартинюк. – Львів: УАД, 2008. – 79 с.

5. Григорьев И.С. Физические величины: справочник [Текст] / И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихова (под. ред.). – М.: Энергоатомиздат, 1991.–1232 с.
6. Загаринская Л. А. Полиграфические материалы [Текст]: учебник / Л. А. Загаринская, Б. Н. Шахкельдян. - Москва: Книга, 1975. – 351 с.
7. Исаченко В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.– М.: Энергоиздат, 1981. –416 с.
8. Йордан Г. Основи поліграфії [Текст] / Г. Йордан – Тернопіль: Підручники і посібники, 2007. – 176 с.
9. Коляно Я. Ю. Нестационарні поля потенціалів тепловологопереносу в процесах конвективного і кондуктивного сушіння поліграфічних матеріалів [Текст] / Я. Ю. Коляно, Т. С. Сасс // Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали міжнар. наук. конференції, присвяченої 85-річчю від дня народження ак. Я. С. Підстригача – Львів, 2013 – Т.1.–С.144-146.
10. Коляно Я. Ю. Перехідні поля потенціалів тепловологопереносу в нескінченній пластині в процесі конвективного сушіння [Текст] / Я. Ю. Коляно, Т. С. Сасс // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. праць.-Львів: УАД, 2010.–№23. – С.183-193.
11. Красников В.В. Кондуктивная сушка. –М.: Энергия, 1973.– 288 с.
12. Лыков А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М.:Энергия, 1968. – 472 с.
13. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.:Госэнергоиздат, 1963.–535с.
14. Маїк В. З. Технологія брошурувально-палітурних процесів [Текст] / В. З. Маїк.– Львів:УАД, 2011.–488 с.
15. Озарків І.М. Діагностика властивостей деревини в технологічних процесах деревообробки / І.М. Озарків, Є.В. Басалига, Я.Ф. Кулешник, І.А. Соколовський, М.С. Кобринич. – Львів:Вид. дім «Панорама», 2003. – 228 с.
16. Репета В. Б. Матеріали і технології лакування поліграфічної продукції [Текст] / В.Б. Репета, В.В. Шибанов. – Львів:УАД, 2011. – 135 с.
17. Угрин Я. М. Основи пакувальної справи. Полімерна тара [Текст] / Я. М. Угрин, Ю. Й. Хведчин, І. І. Регей. — Львів : Укр. акад. друкарства, 2011. — 160 с.
18. Шот Р. І. Теплові процеси в поліграфії [Текст] / Р. І Шот, І. Т. Стрепко. – Львів:УАД, 1998. –2 02с
19. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г. С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336с.