

УДК 539.3:681.1.05

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НЕСТАЦІОНАРНОГО КОНВЕКТИВНОГО НАГРІВАННЯ ОДНОШАРОВИХ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Я. Ю. Коляно, І.Т. Стрепко, О. Р. Марчук (Свирид), К. І. Мельник

Українська академія друкарства
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

Важливою стадією багатьох технологічних процесів, які застосовують у різних галузях промисловості є теплова обробка (нагрівання, сушіння) напівфабрикатів або готових виробів. Основною перешкодою для інтенсивної теплової обробки матеріалів є виникнення напружень, які призводять до погіршення якості виробу, або, навіть до його руйнування. Вибір правильного способу та режиму нагрівання (сушіння) впливає на якість і довговічність виробу. Конвективний спосіб нагріву поряд із кондуктивним (контактним) способом і надалі використовується у поліграфії. Поки що менше використовується інфрачервоний (променевий) спосіб через його дороговизну. У запропонованій статті спочатку на основі математичної постановки, здійсненої згідно з класичною теорією нестационарної теплопровідності академіка О. В. Ликова, розв'язана нестационарна задача конвективної теплопровідності для одношарової пластини за допомогою методу інтегрального перетворення Лапласа. Потім приводяться графіки залежності температури від часу для одношарових матеріалів, які широко використовуються у поліграфії, пакуванні, легкій промисловості та будівництві: картон, бавовна, льон, поліуретан. Ці одношарові матеріали вивчаються для створення у подальшому потрібних кількшарових матеріалів (композитів) з наперед заданими властивостями.

Ключові слова: *теплова обробка, поліграфічна галузь, конвективне нагрівання і сушіння, нестационарні теплопровідність та термовологопровідність, математична модель, теплофізичні параметри, градієнти температури.*

Постановка проблеми. У сучасному поліграфічному виробництві застосовують конвективний, кондуктивний та променевий способи теплової обробки матеріалів [34, 32, 25, 2, 18]. Якщо загалом кількість досліджень конвективного способу є доволі значною, то кондуктивне вивчене менше, особливо щодо поліграфічних матеріалів [11, 18]. Ще менше вивчений променевий спосіб [34, 18]. Дослідження переваг різних способів теплової обробки сприятиме правильному вибору конструкції та режиму роботи відповідних сушарок із урахуванням особливостей висушуваного матеріалу. У зв'язку з цим, актуальним для удосконалення технологій теплової обробки, розроблення методів управління тепловими процесами, які відбуваються у різноманітних поліграфічних

системах, з метою отримання готового продукту чи напівфабрикату якомога вищої якості, скорочення тривалості процесу, а також оптимізації енергозатрат, є розвиток аналітичних методів дослідження процесів нагрівання та сушіння, які базуються на теоріях теплопровідності, тепломасоперенесення і фізико-хімічній механіці матеріалів [14, 23]. З розвитком інформаційних технологій відкриваються нові можливості дослідження процесів теплової обробки матеріалів в поліграфічній індустрії [33, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно математичних основ теорії сушіння процес сушіння матеріалу характеризується зміною в часі трьох основних функцій: температури (температурна крива в залежності від часу); вологовмісту матеріалу (крива сушіння в залежності від часу); швидкості сушіння (крива швидкості сушіння) [17, 18]. Першим кроком для аналізу процесу сушіння є отримання температурних кривих (графіків) залежно від часу, на основі яких можна встановити основні закономірності процесу сушіння [17, 18]. Далі треба отримати криві вологовмісту залежно від часу і потім проаналізувати як вони взаємозв'язано змінюються в часі залежно від швидкості нагріву [17, 25]. Тобто розв'язання задачі теплопровідності (задачі нагрівання) є передумовою (першим кроком) до розв'язання задачі термовологопровідності (задачі сушіння) [25]. На розглянутій у роботі задачі конвективної теплопровідності апробується метод інтегрального перетворення Лапласа (ІПЛ), який використовується у подальших дослідженнях.

При нагріванні (висушуванні) поліграфічних матеріалів можуть виникати напруження спричинені температурним розширенням, які є наслідком існування градієнту температури під час перенесення тепла і залежать від швидкості нагрівання. Було встановлено, що основною причиною утворення тріщин в матеріалі (тобто основною причиною виникнення великих напружень і деформацій) в процесі нагрівання (сушіння) є наявність в ньому полів температури зі значним перепадом (градієнтом) [17]. Ці температурні градієнти породжують відповідні температурні напруження і деформації, які при перевищенні допустимих, можуть призвести до псування матеріалу (жолоблення чи навіть розтріскування) [17].

Велика кількість як одно- так і кількшарових матеріалів (композитів) використовується в поліграфії. При виготовленні (на різних етапах виробництва) і експлуатації вони піддаються тепловій обробці. Такими плоскопаралельними композитами в поліграфії є: деякі види паперу (крейдований папір, картографічний папір) [32, 2], картону (шаруватий картон, що складається з різних шарів (целюлоза, деревна маса, картон), картон із захисною плівкою, гофрокартон) [2]; сучасні пакувальні матеріали (папір-лак, папір-фольга, папір-поліетилен, асептичне пакування) [27, 28, 29]; ламіновані відбитки (нанесення полімеру методом розплаву, припресування полімерних плівок) [28, 29]; палітурні кришки (картон, клейовий шар, покрівельний матеріал) [30, 18]; обкладинки (паперова основа і полімерне покриття) [31]; корінці книжкових блоків при вставленні книжкового блоку в обкла-

динку [18]; друкарські форми та ін.. Кожен із шарів у цих композитах створюється із матеріалу з якісно іншими властивостями і переслідує свої цілі [26]. Оптимізація процесів нагрівання та сушіння таких матеріалів є важливим і актуальним завданням, вирішення якого дозволить: не допустити руйнування чи псування матеріалів, покращити експлуатаційні властивості готової продукції, ефективно використовувати теплову енергію, зменшити витрати виробничого часу [18].

Мета статті – дослідити поведінку певних одношарових поліграфічних матеріалів при конвективному нагріванні, щоб в подальшому порівняти їх поведінку з іншими способами нагрівання та перейти до вивчення і створення потрібних кількшарових (композитних) матеріалів з наперед заданими властивостями (кожен шар виконує свою роль). Нас цікавить виробництво і експлуатація палітурних кришок, паковальних матеріалів (паковань), оздоблювальної поліграфічної продукції, певною мірою військового екіпірування [3, 4], будівельних матеріалів [24], які вже є дво- та тришаровими структурами (композитами) (див. далі рис. 8). І якщо ми спочатку вивчимо нагрів і поведінку кожного одношарового потрібного матеріалу, то потім зможемо на основі цих даних формувати дво-, три- і більше шарові структури (композитні матеріали), які будуть витримувати допустимі теплові навантаження і залишатись якісними під час виготовлення і експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Постановка нестационарної задачі конвективної теплопровідності здійснена на базі класичної теорії теплопровідності академіка О. В. Ликова [14].

Фізична постановка задачі. Розглядається необмежена пластина товщиною $2h$, початкова температура якої t_0 (див. рис. 1). У початковий момент часу $\tau = 0$ нагрівання пластини здійснюється середовищем із температурою t_c . Верхня і нижня поверхні пластини взаємодіють із оточуючим середовищем згідно із законом конвективного теплообміну. Потрібно: знайти розподіл температури в довільній точці пластини залежно від часу; визначити величини градієнтів температури між поверхнями пластини залежно від часу; встановити час, через який температура пластини досягне стаціонарного значення (тобто встановити час прогрівання пластини).

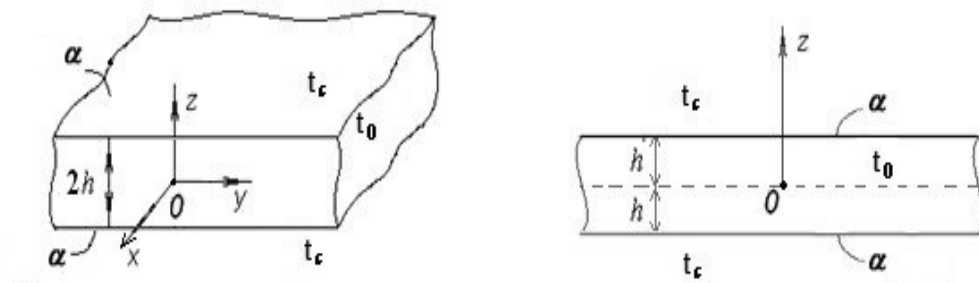


Рис. 1. Схема перерізу пластини, що конвективно нагрівається теплим повітрям температури t_c : а) - тривимірна; б) - двовимірна

Математична постановка задачі розглядається у вигляді початково-крайової задачі для температури $t(z, \tau)$ [14, 21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad \tau > 0, \quad -h < z < h, \quad (1) \\ t(z, \tau) = t_0, \quad \text{при} \quad \tau = 0, \quad (2) \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial z} + \alpha(t - t_c) = 0, \quad \text{при} \quad z = h, \quad (3) \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial z} - \alpha(t - t_c) = 0, \quad \text{при} \quad z = -h, \quad (4) \\ \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z=0 \text{ - умова симетрії,} \end{array} \right.$$

де t_c, t_0 – задані величини;

a, α, λ – коефіцієнти температуропровідності, теплообміну і теплопровідності відповідно.

Розв'язання задачі. До задачі (1) – (4) застосовується інтегральне перетворення Лапласа по часу [14, 21] і отримується крайова задача:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \bar{t}}{dz^2} - \frac{s}{a} \bar{t} = -\frac{t_0}{a} \quad (5) \\ -\lambda \frac{d\bar{t}}{dz} + \alpha \left[\frac{t_c}{s} - \bar{t}(h, s) \right] = 0, \quad \text{при} \quad z = h, \quad (6) \\ \lambda \frac{d\bar{t}}{dz} + \alpha \left[\frac{t_c}{s} - \bar{t}(-h, s) \right] = 0, \quad \text{при} \quad z = -h, \quad (7) \\ \frac{d\bar{t}(z, s)}{dz} = 0. \quad \text{при} \quad z = 0, \quad (8) \end{array} \right.$$

де s – параметр перетворення Лапласа [14],

$\bar{t}(z, s)$ – трансформанта функції $t(z, \tau)$ в просторі зображень. Розв'язком рівняння (5) є вираз

$$\bar{t}(z, s) = Ach \sqrt{\frac{s}{a}} z + Bsh \sqrt{\frac{s}{a}} z + \frac{t_0}{s},$$

постійні A та B у якому знаходимо із крайових умов (6), (8):

$$A = \frac{H(t_c - t_0)}{s \left(\sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} h + Hch \sqrt{\frac{s}{a}} h \right)}, \quad B = 0.$$

Загальний розв'язок задачі (5) – (8) матиме вигляд

$$\bar{t}(z, s) = \frac{(t_c - t_0)ch \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \right)}{s \left[\frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} + ch \sqrt{\frac{s}{a}} \right]} + \frac{t_0}{s} = \bar{t}_1(z, s) + \bar{t}_2(z, s) = \frac{\Phi(s)}{\Psi(s)} + \frac{t_0}{s}, \quad (9)$$

де $H = \alpha/\lambda$;

$\Phi(s)$, $\Psi(s)$ – узагальнені поліноми [14, 21]. Розв’язок (9), як можна перекона-
тись безпосередньою перевіркою, повністю задовольняє задачі (5)-(8).

Для знаходження оригіналу $t(z, \tau)$ трансформанти $\bar{t}(z, s)$ маємо:

$$t(z, \tau) = L^{-1} \left[\bar{t}(z, s) \right] = L^{-1} \left[\bar{t}_1(z, s) \right] + L^{-1} \left[\bar{t}_2(z, s) \right] = t_1(z, \tau) + t_2(z, \tau),$$

$$t_2(z, \tau) = L^{-1} \left[\bar{t}_2(z, s) \right] = L^{-1} \left[\frac{t_0}{s} \right] = t_0.$$

Оригінал $t_1(z, s)$ трансформанти $\bar{t}(z, s)$ знаходимо завдяки теоремі розкладу
Вашенка-Захарченка [14], згідно якої маємо формулу обернення

$$t_1(z, \tau) = L^{-1} \left[\bar{t}_1(z, s) \right] = L^{-1} \left[\frac{\Phi(s)}{\Psi(s)} \right] = \frac{\Phi(0)}{\Psi'(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi(s_n)}{\Psi'(s_n)} e^{s_n \tau}, \quad (11)$$

де s_n – корені знаменника $\Psi(s)$ у виразі (9), т.б. корені рівняння $\Psi(s) = 0$

Звідси знаходимо:

$$1) s=0 \text{ (нульовий корінь);} \quad 2) \frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} + ch \sqrt{\frac{s}{a}} = 0. \quad (12)$$

З останнього рівняння, після замін $chx = \cos ix$, $shx = -i \sin ix$, отримуємо

$$\frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} \left(-i \sin i \sqrt{\frac{s}{a}} h \right) + \cos i \sqrt{\frac{s}{a}} h = 0.$$

Якщо в цьому рівнянні ввести заміну $i \sqrt{\frac{s}{a}} h = \mu$, (тобто $s = -\frac{a}{h^2} \mu^2$) то

$$-\frac{\mu}{Hh} \sin \mu + \cos \mu = 0 \quad \rightarrow \quad ctg \mu = \frac{\mu}{Bi}, \quad (12)$$

де $Bi = Hh$. Рівняння (12), розв’язками якого є μ_n , є характеристичним рів-
нянням.

Тепер знайдемо оригінал $t_1(z, \tau)$, використовуючи формулу обернення (10).
Для першого (нульового) кореня $s=0$ будемо мати

$$\frac{\Phi(0)}{\Psi'(0)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Phi(s)}{\Psi'(s)}, \quad \Phi(0) = \lim_{s \rightarrow 0} \Phi(s) = t_c - t_0.$$

$$\Psi'(s) = \left(s \left[\frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} + ch \sqrt{\frac{s}{a}} \right] \right)' = [\dots] + \frac{1}{H} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} + \frac{1}{2a} h ch \sqrt{\frac{s}{a}} \right) + \dots$$

$$\longrightarrow + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}}, \quad \Psi'(0) = \lim_{s \rightarrow 0} \Psi'(s) = \lim_{s \rightarrow 0} [\dots] + 0 = 1.$$

Отже $\frac{\Phi(0)}{\Psi'(0)} = t_c - t_0$ для останніх коренів s_n , завдяки рівнянню (9), маємо:

$$\Phi(s_n) = \lim_{s \rightarrow s_n} \Phi(s) = (t_c - t_0) \cos \mu_n \frac{z}{h},$$

$$\Psi'(s_n) = \lim_{s \rightarrow s_n} \Psi'(s) = -\frac{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}{2 \sin \mu_n}.$$

Згідно формули (10) матимемо:

$$t_1(z, \tau) = t_c - t_0 - 2(t_c - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \mu_n \frac{z}{h} e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{h^2}}.$$

Таким чином, розв'язок задачі (1)–(4) остаточно прийме вигляд

$$t(z, \tau) = t_1(z, \tau) + t_2(z, \tau) = t_c - (t_c - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{z}{h} e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{h^2}}, \quad (13)$$

$$\text{де } A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n};$$

μ_n – корені характеристичного рівняння (12).

Зауважимо, що при $\tau \rightarrow \infty$ із останнього рівняння отримуємо стаціонарне значення температурного поля

$$t_{CT}(z) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} t(z, \tau) = t_c. \quad (14)$$

Задачу (1)–(4) можна розглядати в безрозмірних змінних з метою зменшення числа теплофізичних параметрів матеріалу пластини у подальших чисельних обрахунках:

$$\left\{ \begin{array}{lll} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = \frac{\partial T}{\partial Fo}, & Fo > 0, & -1 < Z < 1 \quad (15) \\ T(Z, Fo) = 0, & \text{при} & Fo = 0, \quad (16) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} + Bi(T - T_c) = 0, & \text{при} & Z = 1, \quad (17) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} - Bi(T - T_c) = 0, & \text{при} & Z = -1, \quad (18) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} = 0, & \text{при} & Z = 0 \text{ - умова симетрії,} \end{array} \right.$$

де $T = t - t_0$, $T_c = t_c - t_0$, t_c , t_0 – задані величини;
 a , α , λ – коефіцієнти теплопровідності, теплообміну і теплопровідності відповідно. У результаті обезрозмірення виникають безрозмірні параметри (критерії) $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$, $Fo = \frac{a\tau}{h^2}$, $Z = \frac{z}{h}$, вивчення поведінки яких дозволяє більш глибоко розкрити фізичну суть розглядуваного процесу нагріву [14, 2]. Після розв'язання задачі (15)-(18) розв'язок запишеться у безрозмірному вигляді так

$$T(Z, Fo) = T_c \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n Z e^{-\mu_n^2 Fo} \right), \quad (19)$$

де $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$, μ_n – корені характеристичного рівняння (12).

Зауважимо, що при $Fo \rightarrow \infty$ із останнього рівняння отримуємо стаціонарне значення безрозмірного температурного поля

$$T(Z, Fo) = T_c \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n Z e^{-\mu_n^2 Fo} \right), \quad (20)$$

Якщо у розв'язку (19) перейти до розмірних величин, то отримаємо розв'язок (13).

Чисельні обрахунки нестационарної задачі теплопровідності для одношарової пластини щодо конвективного нагрівання проводимо за формулою (13), яка лягла в основу розробленого програмного засобу (модуля) на мові Fortran для розрахунку нестационарної температури. З одержаних графіків хочемо визначити: 1) поведінку температури залежно від часу в різних точках пластини і, як наслідок, вихід температури на стаціонарне (стале) значення для пластин різної товщини; 2) величину температурних градієнтів залежно від часу. Приймаємо, що пластини виготовлена з картону ($\lambda = 0,2 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$, $a = 0,174 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$, $\alpha \approx 15 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$) [2]; або бавовни ($\lambda = 0,042 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$, $a = 0,49 \times 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$, $\alpha = 15 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$) [1]; або льону ($\lambda = 0,1 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$, $a = 0,1 \times 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$, $\alpha = 15 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$) [4]; або поліуретану ($\lambda = 0,026 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$, $a = 0,3 \times 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$, $\alpha = 10 \text{ Bm} / (\text{M}^\circ\text{C})$) [5, 2]. Пластини має початкову температуру $t_0 = +10^\circ\text{C}$, підігрівається через нижню та верхню поверхню температурою оточуючого середовища $t_c = +80^\circ\text{C}$. Ці вхідні температурні параметри відповідають виробничим і експериментальним [17, 3, 22].

Розглянемо матеріали і їх властивості, які використовуються в подальших обрахунках:

Картон – це листовий, переважно рослинного походження матеріал. Температура самозаймання картону починається від 451°F ($\approx 230^\circ\text{C}$). Картон використовується у поліграфії, найчастіше при виготовленні палітурних кришок, обкладинок, пакувань та інших виробів та напівфабрикатів [2, 18].

Бавовна – текстильне волокно рослинного походження. Це найважливіше натуральне волокно, що використовується в текстильному виробництві для одягу, товарів

для дому і промислової продукції [10]. Волокна бавовни можуть витримувати порівняно високі температури. При температурі 150-170°C волокно починає руйнуватися, при температурі 250 °C і вище розкладання протікає досить інтенсивно. Нагрівання при більш високих температурах супроводжується зменшенням маси волокон внаслідок їх руйнування і видалення легких речовин, зміною кольору волокон з сірого на жовтувато-бурий. Під час дії високої температури (вище 250 °C) на зволене волокно, при контакті з металевими поверхнями, при повітряному сушінні волокна не руйнуються. Доки вологога з волокна не випарується, температура його не перевищує 100 °C, однак після втрати вологи волокно руйнується, причому руйнування супроводжується розкладанням та обуглюванням целюлози [9]. Для бавовни характерні відносно висока міцність, хімічна стійкість, теплостійкість (130—140 °C), середня гігроскопічність (18-20 %) і мала частка пружної деформації, внаслідок чого вироби з бавовни сильно мнуться. Стійкість бавовни до стирання невелика [9].

Льон – це другий текстильний матеріал, для якого робимо чисельний аналіз. Льон - це волокна, які виробляються з луб'яних частини стебла рослини льону. Товщина елементарних волокон льону така ж, як і волокон бавовни, довжина їх дорівнює 15-26 мм. Довжина технічних волокон залежить від довжини стебла рослини. Товщина технічних волокон льону визначається товщиною елементарних волокон і їх числом в пучку. Міцність елементарного волокна льону в 3-5 разів перевершує міцність волокон бавовни. Гігроскопічність льону при нормальних умовах 12-17%. Льон вбирає і віддає вологу швидше ніж бавовна. Під дією води міцність елементарних волокон зростає, а технічних зменшується, так як послаблюється зв'язок між окремими пучками волокон. Дію нагрітої металевої поверхні льон переносить краще, ніж бавовна. Льон витримує найбільш високі температури (190-230°C). При високих температурах льон починає горіти, його особливості горіння: полум'я жовте, згоряє повністю, попіл сірий, запах паленого паперу. Особливості горіння такі ж, як у бавовни, тому що льон, так само як і бавовна в своєму складі містить целюлозу [12].

Поліуретан – полімер, який застосовується у багатьох сферах промисловості. З нього виготовляють побутові предмети, запчастини тощо [13, 15]. Його фізичні властивості різноманітні: він добре переносить високі температури, зносостійкий, міцний і при цьому дуже еластичний. Поліуретан може використовуватися в різних формах: рідкому стані або у вигляді листів. В умовах постійного динамічного навантаження верхньою межею температури експлуатації слід вважати +120°C. Низькі температури практично не змінюють властивості поліуретанів. Зміни еластичності і твердості, що виникли при температурах не нижче – 18°C, носять обернений характер. Крихкість починає з'являтися при температурах нижче -60, -80°C. Таким чином, робочі температури поліуретанових виробів знаходяться в діапазоні від -60°C до +100°C і еластичність при цьому практично не змінюється. Допускається періодичне підвищення температури до 130, 140°C [13, 15]. Поліуретан використовується у взуттєвій, будівельній, автомобільній та ін. галузях. В пакувальній справі він майже не використовується .

Поліпропілен – синтетичний полімер, продукт полімеризації пропілену. Безбарвна речовина; густина (при температурі 20 °C) 920—930 кг/м³, температура

плавлення 172 °С. Характеризується високою ударною міцністю, стійкістю до багаторазових згинань, зносостійкістю, низькою паро- й газопроникністю, високими діелектричними показниками. Поліпропілен не розчиняється в органічних розчинниках, стійкий до дії киплячої води і лугів; руйнується під дією азотної та сірчаної кислот, хромової суміші; відзначається низькою термо- і світлостійкістю [16, 6-8].

Поліетилен – це термопластичний прозорий полімер з високою хімічною стійкістю. Іншими словами, це насичений полімерний вуглеводень — твердий, безколірний, жирний на дотик матеріал. Він легший за воду, горить повільно синюватим полум'ям і без кіптяви. Поліетилен випускається в промисловості різними методами, відрізняється густиною, молекулярною масою та ступенем кристалічності. Головною причиною, яка викликає різницю властивостей поліетилену є різна розгалуженість макромолекул: чим більше розгалужень в ланцюгу, тим вища еластичність і менша кристалічність полімеру. Сировиною для нього служить найпростіший олефін — етилен. Поліетилен отримують шляхом полімеризації етилену при низькому і високому тиску. Руйнується тільки під впливом фтору, хлору і 50-процентної азотної кислоти. Фізичні властивості поліетилену залежать від його різновиду. Чим нижча щільність, тим м'якший поліетилен. Температура плавлення поліетилену ПНД становить 125-132 °С. У поліетилену ПВД цей поріг нижче – 103-110 °С. Поліетилен будь-якого виду стійкий до ударів, не пропускає і не вбирає воду, непроникний для пилу і морозостійкий. Власне, базуючись на тому яким шляхом було отримано поліетилен, вирізняють його різновиди: від поліетилену високої щільності (HDPE) – це поліетилен з лінійною макромолекулою і відносно високою щільністю (0,960 г/см³) до поліетилену низької щільності (LDPE) — це поліетилен з порівняно сильно розгалуженою макромолекулою і низькою щільністю (0,916-0,935 г / см³). Процес його отримання протікає при дуже високому тиску від 100 до 300 мПа і температурі 100-300 °С. Поліетилен середнього тиску більш стійкий до подряпин і розтріскування. Застосовується цей поліетилен для виробництва звичайних і термоусадочних плівок, мішків, господарських сумок і гвинтових ковпачків [19].

На графіках рисунків 2–5 продемонстровано весь перехідний (нестационарний) процес нагрівання пластин, виготовлених з картону, бавовни, льону та поліуретану аж до стаціонарного стану. Спостерігаємо за трьома поверхнями пластини: $Z=1$ – верхня (зовнішня) поверхня, $Z=0$ – серединна поверхня, $Z=0,5$ – поверхня, рівновіддалена від верхньої та серединної (див. рисунок 1). Як бачимо із графіків поведінка температури різних матеріалів відрізняється. Температура зовнішньої поверхні пластини ($Z=1$), порівняно із серединою пластини ($Z=0$), з самого початку процесу нагрівання є більшою, що призводить до появи градієнтів. Як видно із рисунків 2-7 максимальні градієнти температури збільшуються зі збільшенням товщини пластини. Наприклад, для картонної пластини товщиною 1 мм максимальні градієнти становлять 3 °С, а для товщини 5 мм – 9 °С (див. рис. 6, 2); для поліуретанової пластини товщиною 1 мм – 6 °С, а для товщини 5 мм – 26 °С (див. рис. 7, 5). Також зі збільшенням товщини збільшується і час прогріву пластини.

За допомогою запропонованих на рисунках 2-5 графіків можна скласти таблицю для знаходження часу виходу температури на стаціонарне значення (часу прогріву пластини) в довільній точці картонної, бавовняної, лляної та поліуретанової пластин, яка записана для товщини 5 мм (див. таблицю 1). Як бачимо із таблиці 1 температура картонної пластини виходить на стаціонар через $\approx 11,97$ хв.; бавовняної – через $\approx 4,25$ хв.; лляної – через $\approx 15,6$ хв.; а поліуретанової – через $\approx 3,5$ хв. (використовується друга часова вісь для τ).

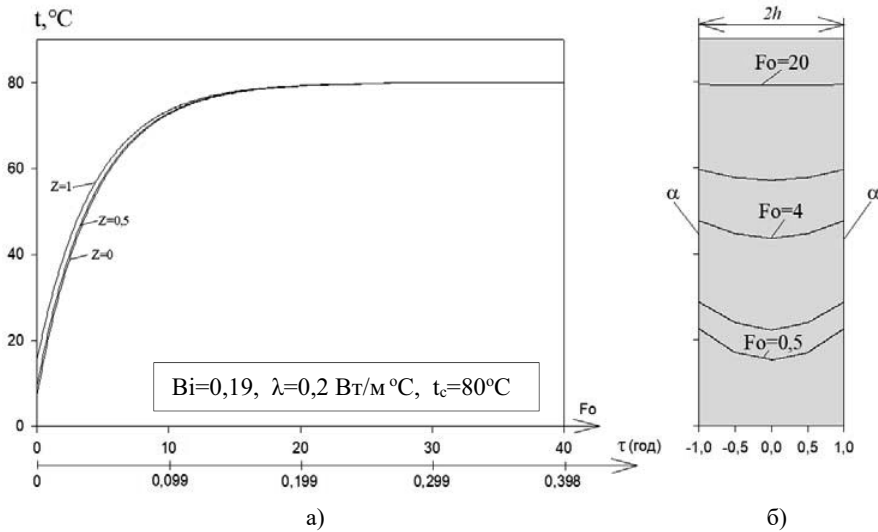


Рис. 2. Розподіл температури в часі при конвективному нагріванні картонної пластини товщиною $2h=5$ мм: а) графіки розподілу температури пластини в часі; б) схема розподілу температури по перерізу пластини в часі.

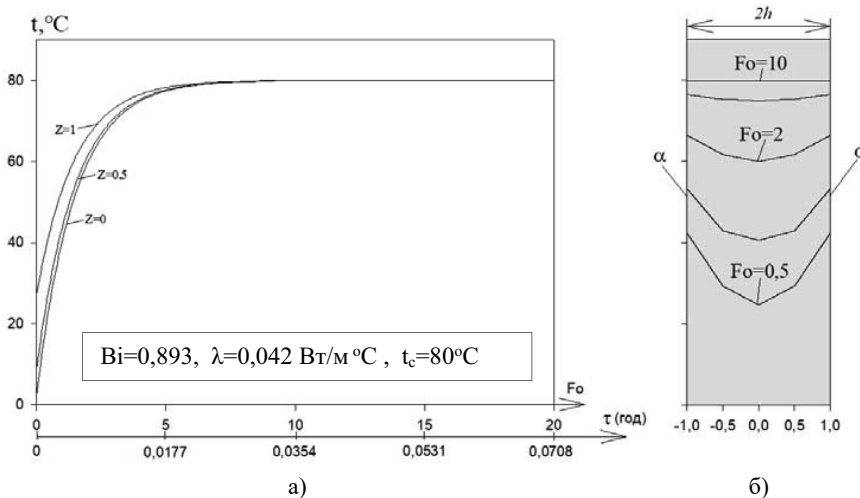


Рис. 3. Розподіл температури в часі при конвективному нагріванні бавовняної пластини товщиною $2h=5$ мм: а) графіки розподілу температури пластини в часі; б) схема розподілу температури по перерізу пластини в часі.

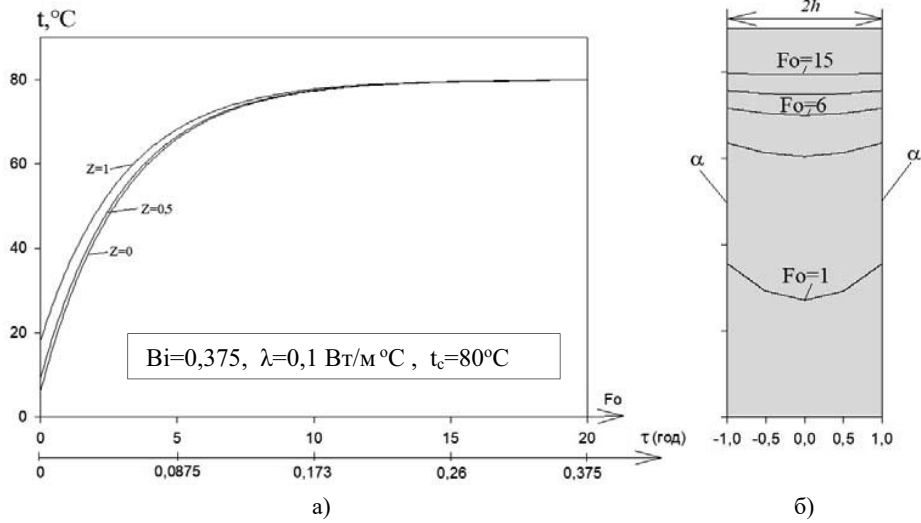


Рис. 4. Розподіл температури в часі при конвективному нагріванні льняної пластини товщиною $2h=5$ мм: а) графіки розподілу температури пластини в часі; б) схема розподілу температури по перерізу пластини в часі.

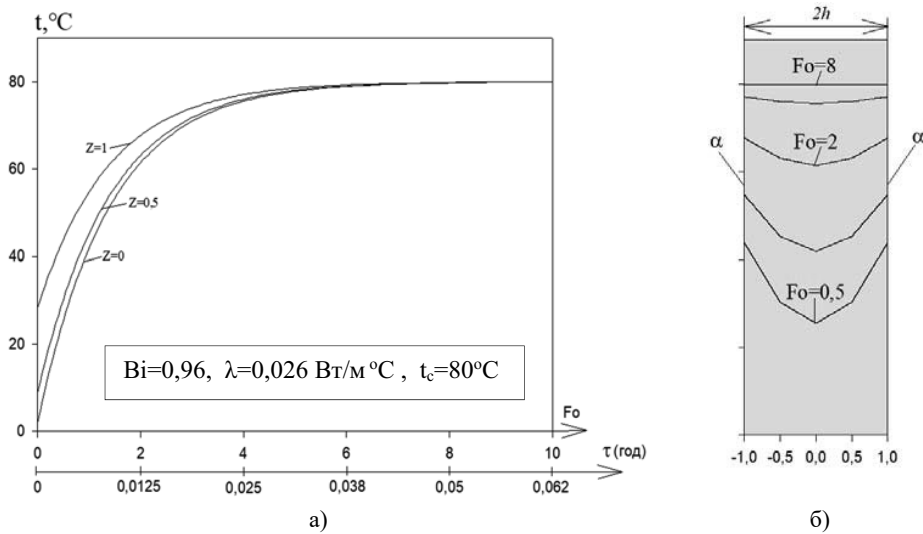


Рис. 5. Розподіл температури в часі при конвективному нагріванні поліуретанової пластини товщиною $2h=5$ мм: а) графіки розподілу температури пластини в часі; б) схема розподілу температури по перерізу пластини в часі.

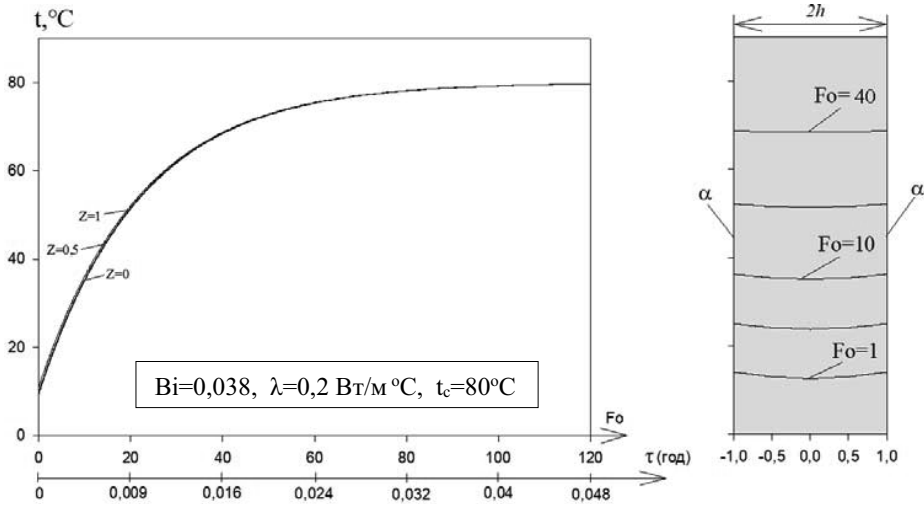


Рис. 6. Розподіл температури в часі при конвективному нагріванні картонної пластини товщиною $2h=1$ мм: а) графіки розподілу температури пластини в часі; б) схема розподілу температури по перерізу пластини в часі.

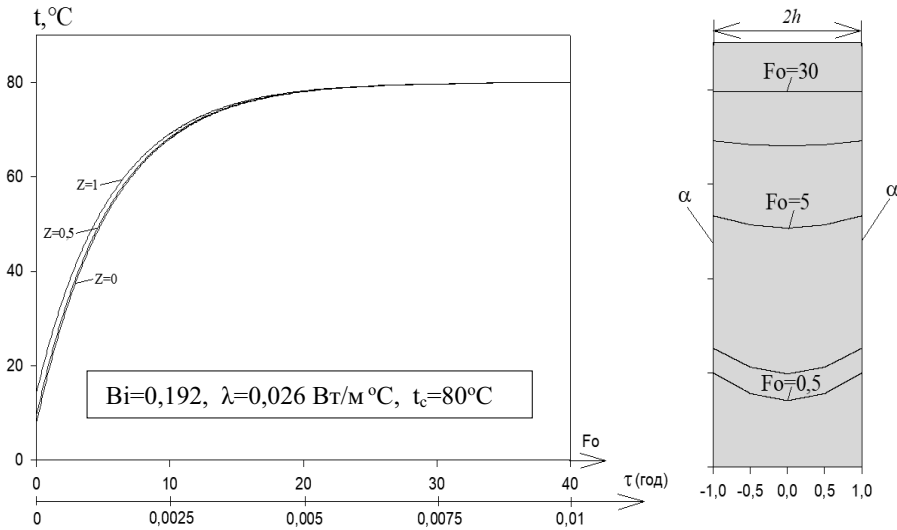


Рис. 7. Розподіл температури в часі при конвективному нагріванні поліуретанової пластини товщиною $2h=1$ мм: а) графіки розподілу температури пластини в часі; б) схема розподілу температури по перерізу пластини в часі.

Ляна пластина прогрівається довше ніж картонна, бавовняна та поліуретанова.

Таблиця 1

Визначення часу виходу температури t на стаціонарне значення (τ_{ct}) в довільній точці пластини товщини $h=5\text{мм}$.

Поліграфічний матеріал	Критерій Bi	Теплове навантаження	Час	
Картон	0,19	$t_c=80^\circ\text{C}$	$\tau_{ct} \approx 11,97 \text{ хв.}$	$Fo_{ct} \approx 20$
Бавовна	0,89	$t_c=80^\circ\text{C}$	$\tau_{ct} \approx 4,25 \text{ хв.}$	$Fo_{ct} \approx 20$
Льон	0,375	$t_c=80^\circ\text{C}$	$\tau_{ct} \approx 15,6 \text{ хв.}$	$Fo_{ct} \approx 15$
Поліуретан	0,96	$t_c=80^\circ\text{C}$	$\tau_{ct} \approx 3,5 \text{ хв.}$	$Fo_{ct} \approx 10$

У теорії нагріву розглядається нагрів тонких та масивних тіл [20, 2]. У тонких тілах перепад (градієнт) температур по перерізу матеріалу такий невеликий, що ним можна знехтувати. При нагріві масивних тіл перепад (градієнт) температур досягає значної величини і його необхідно враховувати в практичних розрахунках. Поділ тіл, що нагріваються, на тонкі та масивні є умовним, тому що визначається він не тільки розмірами, а й теплофізичними властивостями матеріалу та швидкістю їх нагрівання. Тіло, що має великі розміри, при досить повільному нагріванні має незначні перепади температур і може розглядатись як тонке і навпаки. Для встановлення межі між тонкими та масивними тілами, за рекомендацією Г. П. Іванцова [20, 2], використовується критерій Біо: $Bi = ah/\lambda$. Критерій Біо вводиться в математичну модель шляхом обезрозмірення задачі теплопровідності. Г. П. Іванцов запропонував для металів називати тіла тонкими, якщо для нагріву в зазначених умовах $Bi < 0,25$ та масивними, якщо $Bi > 0,5$. Інтервал значень $Bi = 0,25 \dots 0,50$ являє собою перехідну область, котру за точних розрахунків слід віднести до масивних тіл, а за наближених розрахунків — до тонких [20, 2]. Отже, критерій Bi , для випадку коли $\alpha = const$ і при малій тривалості інерційного періоду порівняно із загальною тривалістю нагрівання, є величиною, що здатна характеризувати міру масивності тіла (ефект Г. П. Іванцова). Таким чином, якщо значення критерію Біо велике (тіло масивне), то процес нагрівання відбувається з великим перепадом (градієнтом) температур між поверхнями тіла. Якщо значення критерію Біо мале (тіло тонке), то перепад температур по перерізу (градієнт) тіла буде незначним [20, 2]. Наприклад, картон товщиною 5мм і 1мм (див. рис. 2, 6) веде себе як тонке тіло – градієнти температури незначні (відповідно $Bi = 0,19 < 0,25$ і $Bi = 0,038 < 0,25$). Поліуретан товщиною 5мм (див. рис. 5) веде себе як масивне тіло – градієнти значні ($Bi = 0,96 > 0,5$), а поліуретан товщиною 1мм (див. рис. 7) як тонке тіло – градієнти незначні ($Bi = 0,192 < 0,25$). Отже, критерій Bi і при нагріванні картону, поліуретану, бавовни, льону є величиною, що здатна характеризувати міру масивності тіла, тобто ефект Г. П. Іванцова отримав подальше продовження на картон, поліуретан, бавовну, льон. Крім того, з наведених графіків видно, що чим товстіша пластина, тим краще вона затримує тепло (тобто тим більші виникають температурні градієнти).

На рисунку 8 розглянуті поліграфічні та інші виробничі процеси, які можна фізико-математично змоделювати як теплову обробку (нагрівання, сушіння) відповідних кількшарових пластин [26, 4, 24].

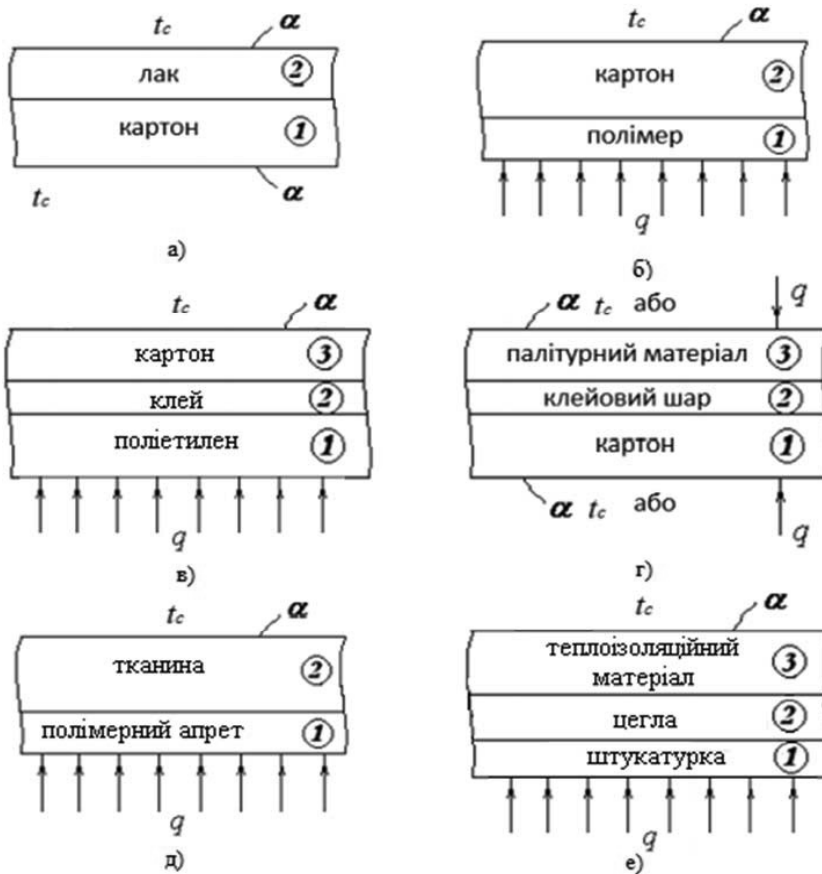


Рис.8. Теплова обробка кількшарових пластин(композитів): а) лакування на картон; б) припресування полімерної плівки на картон; в) припресування харчової плівки на картон при виготовленні пакування; г) конвективне чи променеве сушіння палітурних кришок; д) насичення тканини полімерним апретом; е) нагрів стіни будинку.

Висновки. 1. За допомогою розв'язаної нестационарної задачі конвективної теплопровідності і розробленого відповідного програмного засобу (модуля) створено графіки поведінки температури залежно від часу для таких поліграфічних матеріалів, як картон, бавовна, льон, поліуретан. Здійснено огляд властивостей та уточнено теплофізичні параметри картону, бавовни, льону та поліуретану, що дозволило змоделювати процес нестационарного конвективного нагрівання цих матеріалів різної товщини. Розглянута задача корисна для вивчення в часі процесів теплової обробки (нагрівання, сушіння) поліграфічної продукції коли підвід тепла здійснюється конвективним способом. Наприклад, сушіння картону, паперу, текстильних матеріалів, палітурних кришок тощо.

2. Розподіл температури по перерізу пластини для конвективного нагрівання має вигляд симетричної параболи (див. рис. 2-5 б). Це добре узгоджується з відомими у літературі теоретичними і практичними дослідженнями [14, 18, 2]. Динаміка процесу по нестационарних графіках спостерігається в перехідні моменти часу (тобто до прогріву пластини). Небезпечні градієнти температури в конвективному способі виникають на початку нагріву (див. рис. 2-5 а).

3. За допомогою отриманих графіків, видно що із збільшенням товщини матеріалу збільшуються перепади (градієнти) температури між поверхнями пластини. Ці градієнти породжують небезпечні температурні напруження і деформації, які можуть призвести до псування матеріалу. Товщина матеріалу суттєво впливає на тривалість його нагрівання. Чим більша товщина, тим довший час виходу температури на стаціонар, тобто пластини довше прогрівається.

4. Підтверджено чисельними обрахунками, що картон, бавовна, льон, а особливо поліуретан – хороші теплоізоляційні матеріали, бо добре затримують тепло. З графіків видно, що чим матеріал має менший коефіцієнт теплопровідності λ , тим він краще затримує тепло (тобто він кращий теплоізолятор) (див. рис. 2-7). Цей факт добре відомий на практиці. По значенню λ інженер-технолог може визначити чи є пластини з певного матеріалу теплоізолятором чи ні.

5. Встановлено чисельними обрахунками, що введення в математичну постановку задачі нестационарної теплопровідності безрозмірного параметра $Bi = ah/\lambda$ дозволяє, згідно його величини, робити висновок щодо тонкості чи масивності пластини. Тобто критерій Bi є для розглядуваної задачі мірою масивності. Отримала продовження стосовно картону, тканин та полімерів рекомендація (ефект) Іванцова Г. П., згідно з якою при нагріванні масивних пластин (при значеннях $Bi \geq 0,25$) виникають значні градієнти температури, а при нагріванні тонких (при значеннях $Bi < 0,25$) – незначні (див. рис. 2-7). Для інженера-технолога це означає, що по величині Bi можна визначити чи будуть виникати небезпечні градієнти (напруження) в пластині чи ні.

6. Математичне моделювання процесу конвективного нагрівання розглянутих потрібних матеріалів дають змогу розробляти нові композиційні матеріали з наперед заданими властивостями. Аналіз отриманих графіків дозволяє підібрати оптимальний режим нагрівання, що позитивно вплине на якість матеріалів та їх експлуатаційні властивості. Розроблений програмний пакет дає можливість побачити на графіках температурні градієнти та час виходу температури на стаціонар (час прогрівання пластини). Підбір комбінацій матеріалів, з яких виготовлений композит дозволить зменшити його товщину і масу без втрати потрібних властивостей виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел —М. : Энергоиздат, 1981. —416 с.
2. Сасс Т. С. Інформаційні технології удосконалення процесів сушіння поліграфічних матеріалів: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06/ Тарас Стефанович Сасс. —Львів, -2015. —202 с.

3. Ольшанский А. И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе их сушки. Инженерно-физический журнал 2014. Т. 87, № 6. С. 1308-1318.
4. Ольшанский А. И. Жерносек С. В. Исследования процесса конвективно-радиационной сушки технических тканей методом регулярного режима // Инженерно-физический журнал . –т. 87, №5. 2014. С. 1113-1122.
5. Ильинский В. М. Строительная теплофизика / В. М. Ильинский —М. : Высшая школа, 1974. — 320 с.
6. Новиченок Н. Л. Теплофизические свойства полимеров/ Н. Л. Новиченок, З. П. Шульман /Минск:«Наука и техника» -1971. —120 с.
7. Свойства полимеров: теплопроводность и плотность пластиков и пластмасс [Электронный ресурс]–Режим доступа: <http://thermalinfo.ru>
8. Физические величины. Справочник/А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова —М.: Энергоатомиздат, -1991. —1232 с.
9. Кравцова Л. В. Матеріалознавство виробів [Електронний ресурс]/ Л. В. Кравцова, Н. В. Прошина, М. О. Кушевський /Режим доступу: <http://dn.khnu.km.ua/>
10. Бавовна[Электронный ресурс]–Режим доступа: <https://www.wikiwand.com/>
11. Воробьев Д. В. Технология брошюровочно-переплетных процессов /Д. В. Воробьев, А. И. Дубасов, Ю. М. Лебедев;М.: Книга, 1989. – 392с.
12. Волокнистые материалы и их свойства[Электронный материал]/ А. Н. Гарист, А. С. Балабан. –Режим доступа:<https://ggptknhp.by/>
13. Кузнецов Е. В. Альбом технологических схем производства полимеров и пластических масс на их основе / Е. В. Кузнецов, И. П. Прохорова, Д. А. Файзулина/2-е издания. М: «Химия», – 1976.–108с.
14. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков –М.: Высшая школа, – 1967. –599 с.
15. Писаренко В. В. Справочник лаборанта-химика. Справ. пособие для проф.-техн. учебн. Заведений/ В. В. Писаренко / М., «Высшая школа», – 1970. —192 с.
16. Полипропилен (ПП) :основные свойства, область применения [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://plastinfo.ru/>
17. Лыков А. В.Теория сушки/А. В. Лыков —М. : Энергия, 1968. — 472. с.
18. Шот Р. І. Теплові процеси в поліграфії: навч. посібник / Р. І. Шот, І. Т. Стрепко. – Львів : УАД «Фенікс», 1998. – 202 с.
19. Сировина на нашому підприємстві: Поліетилен. URL: www.ua.greif-fps.com
20. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки: підручник / О. О. Ткаченко – К.:А.С.К., 2005. – 480 с.
21. Свирид О. Р. Математичне моделювання конвективної теплової обробки одного двохшарових поліграфічних матеріалів: маг. робота / О. Р. Свирид – Львів: УАД. – 2020. – 120 с.
22. Шолота К. В. Інтесифікація процесу сушіння композитних деревинних матеріалів: Автореферат дис. канд. техн. наук. Львів: Український державний лісотехнічний університет, 1998. – 19с.
23. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов — М. Госэнергоиздат, 1963. — 535 с.
24. Федосов С. В., Ибрагимов А. М. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях // Строительные материалы. №4. 2006.-С. 86-87.

25. Коляно Я.Ю. Моделирование кондуктивной сушки полиграфических материалов капиллярно-пористой коллоидной структуры/ Я. Ю. Коляно, Т. С. Сасс, Е. Г. Иванник //Инженерно-физический журнал. – Минск, - 2018.-91, №5. С.1231-1241.
26. Коляно Я. Ю. Моделювання теплової обробки одно- та кількшарових матеріалів у поліграфічних процесах /Я. Ю. Коляно, І. Т. Стрепко, О. Р. Свирид, О.Є. Бабич, К. І. Мельник// Комп'ютерні технології друкарства: збір. наук. праць. – №1 (41). – 2019. – С.102-115.
27. Innovations at Tetra Pack. URL: www.tetrapak.com.
28. Гавенко С. Ф., Мартинюк М. С. Технологія ламінування друкарських відбитків: навч. посіб. Львів: УАД, 2008. - 80 с.
29. Кирилук А. В., Зоренко О. В., Розум Т. В. Технологічні особливості ламінування листівок.// Поліграфія і видавнича справа. — Львів: УАД, 2011. – С. 90–100.
30. Гавенко С. Ф., Кулік Л. Й., Мартинюк М. С. Конструкція книги: навч. посібн. Л.: «Фенікс», 1999. – 136 с.
31. Жидецький Ю. Ц., Лазаренко О. В., Лотошинська Н. Д.. Поліграфічні матеріали: Підручник. За заг. ред. докт. техн. наук проф. Е. Т. Лазаренка. Львів: Афіша, 2001. — 328с.
32. Иванов С. Н. Технология бумаги. — Москва: Московская типография №2, 2006. 696 с.
33. Інформаційні технології формування якості книжкових видань: Монографія / І. В. Піх, Б. В. Дурняк, В. М. Сеньківський, Т. С. Голубник. Львів: УАД, 2017. 308 с.
34. Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition. Boca Raton (USA), 2015. -1333 p.

REFERENCES

1. Isachenko V. P. (1981). Teploperedacha / V. P. Isachenko, V. A. Osipova, A. S. Sukomel — M. : Jenergoizdat,—416 s. (in Russian)
2. Sass T. S. (2015). Informacijni tekhnolohiyi udoskonalennya procesiv sushinnya polihrafichnykh materialiv: dys. ... kand.. tekhn.. nauk: 05.13.06/ Taras Stefanovych Sass. –L'viv —202. (in Ukrainian)
3. Ol'shanskij A. I. (2014). Reguljarnyj teplovoj rezhim nagrevanija vlazhnyh ploskih kapilljarno-poristyh materialov v processe ih sushki. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. T. 87, # 6. S. 1308-1318. (in Russian)
4. Ol'shanskij A. I. Zhernosek S. V. (2014). Issledovanija processa konvektivno-radiacionnoj sushki tehniceskikh tkanej metodom reguljarnogo rezhima // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal . –t. 87, #5. S. 1113-1122. (in Russian)
5. Il'inskij V. M. (1974). Stroitel'naja teplofizika / V. M. Il'inskij —M. : Vysshaja shkola— 320 s. (in Russian)
6. Novichenok N. L. (1971). Teplofizicheskie svojstva polimerov/ N. L. Novichenok, Z. P. Shul'man /Minsk:«Nauka i tehnika» —120 s. (in Russian)
7. Svojstva polimerov: teploprovodnost' i plotnost' plastikov i plastmass [Elektronnyj resurs]—Rezhim dostupa: <http://thermalinfo.ru> (in Russian)
8. Fizicheskie velichiny. Spravochnik (1991). /A. P. Babichev, N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskij i dr.; Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlihoва — M.: Jenergoatomizdat —1232 s. (in Russian)
9. Kravcova L. V. Materialoznavstvo vyrobiv [Elektronnyj resurs]/ L. V. Kravcova, N. V. Proshyna, M. O. Kushhevs'kyj /Rezhym dostupu: <http://dn.khnu.km.ua/> (in Ukrainian)

10. Bavovna [Elektronnyj resurs]—Rezhym dostupu: <https://www.wikiwand.com/> (in Ukrainian)
11. Vorob'ev D. V. (1989). Tehnologija broshjurovochno-perepletnyh processov /D. V. Vorob'ev, A. I. Dubasov, Ju. M. Lebedev;M.: Kniga - 392s. (in Russian)
12. Voloknistye materialy i ih svojstva [Elektronnij material]/ A. N. Garist, A. S. Balaban. —Rezhim dostupa:<https://ggptknhp.by/> (in Russian)
13. Kuznecov E. V. (1976).Al'bom tehnologicheskikh shem proizvodstva polimerov i plasticheskikh mass na ih osnove / E. V. Kuznecov, I. P. Prohorova, D. A. Fajzulina/2-e izdanija. M: "Himija" -108s. (in Russian)
14. Lykov A. V. (1967). Teorija teploprovodnosti / A. V. Lykov —M.: Vysshaja shkola -599 s. (in Russian)
15. Pisarenko V. V. (1970). Spravochnik laboranta-himika. Sprav. posobie dlja prof.-tehn. uchebn. Zavedenij/ V. V. Pisarenko / M., «Vysshaja shkola»—192 s. (in Russian)
16. Polipropilen (PP) :osnovnye svojstva, oblast' primeneniya [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <https://plastinfo.ru/> (in Russian)
17. Lykov A. V. (1968). Teorija sushki/A. V. Lykov —M. : Jenergija— 472. s. (in Russian)
18. Shot R. I. (1998). Teplovi procesy v polihrafiyi: Navch. posibnyk / R. I. Shot, I. T. Strepko. —L'viv : UAD «Feniks» - 202 s. (in Ukrainian)
19. Syrovyna na nashomu pidpryyemstvi: Polietylen. URL: www.ua.greif-fps.com (in Ukrainian)
20. Tkachenko O. O. (2005). Vysokotemperaturni procesy ta ustanovky: pidruchnyk / O. O. Tkachenko — K.:A.S.K. - 480 s. (in Ukrainian)
21. Svyryd O. R. (2020). Matematychni modelyuvannya konvektyvnoyi teplovoyi obrobky odno- ta dvosharovyx polihrafichnyx materialiv: mah. robota / O. R. Svyryd — L'viv: UAD — 120 s. (in Ukrainian)
22. Sholota K. V. (1998). Intesyfikaciya procesu sushinnya kompozytnyx derevnyx materialiv: Avtoreferat dys. kand. texn. nauk. L'viv: Ukrayins'kyj derzhavnyj lisotexnichnyj universytet - 19s. (in Ukrainian)
23. Lykov A. V. (1963). Teorija teplo- i massoperenosa / A. V. Lykov, Ju. A. Mihajlov — M. Gosjenergoizdat— 535 s. (in Russian)
24. Fedosov S. V., Ibragimov A. M. (2006). Nestacionarnyj teplo- i massoperenos v mnogoslolnyh ograzhdajushhih konstrukcijah // Stroitel'nye materialy. #4.-S. 86-87. (in Russian)
25. Koljano Ja.Ju. (2018). Modelirovanie konduktivnoj sushki poligraficheskikh materialov kapilljarno-poristoj kolloidnoj struktury/ Ja. Ju. Koljano, T. S. Sass, E. G. Ivanik // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. — Minsk -91, #5. S.1231-1241. (in Russian)
26. Kolyano Ya. Yu. (2019). Modelyuvannya teplovoyi obrobky odno- ta kil'kasharovyx materialiv u polihrafichnyx procesax /Ya. Yu. Kolyano, I. T. Strepko, O. R. Svyryd, O.Ye. Babych, K. I. Mel'nyk// Komp'yuterni tehnolohiyi drukarstva: zbir. nauk. prac". — №1 (41). — S.102-115. (in Ukrainian)
27. Innovations at Tetra Pack. URL: www.tetrapak.com. (in English)
28. Havenko S. F., Martynyuk M. S. (2008). Tekhnolohiya laminuvannya drukars'kykh vidbytkiv: navch. posib. L'viv: UAD - 80 s. (in Ukrainian)
29. Kyrylyuk A. V., Zorenko O. V., Rozum T. V. (2011). Tekhnolohichni osoblyvosti laminuvannya lystivok.// Polihrafiya i vydavnycha sprava. — L'viv: UAD. S. 90-100. (in Ukrainian)
30. Havenko S. F., Kulik L. J., Martynyuk M. S. (1999). Konstrukciya knyhy: navch. posibn. L.: «Feniks», 136 s. (in Ukrainian)

31. Zhydec'kyj Yu. C., Lazarenko O. V., Lotoshyns'ka N. D. (2001). Polihrafichni materialy: Pidruchnyk. Za zah. red. dokt. texn. nauk prof. E. T. Lazarenka. L'viv: Afisha— 328s. (in Ukrainian)
32. Ivanov S. N. (2006). Tehnologija bumagi. — Moskva: Moskovskaja tipografija #2, 696 s. (in Russian)
33. Informacijni tehnolohiyi formuvannya yakosti knyzhkovyx vydan': Monohrafiya (2017). / I. V. Pix, B. V. Durnyak, V. M. Sen'kivs'kyj, T. S. Holubnyk. L'viv: UAD, 308 s. (in Ukrainian)
34. Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition. Boca Raton (USA), 2015. -1333 p. (in English)

DOI 10.32403/2411-9210-2020-1-43-97-115

STUDY OF THE PROCESS OF NON-STATIONARY CONVECTIVE HEATING OF SINGLE-LAYER PRINTING MATERIALS

Ya. Yu. Kolyano, I. T. Strepko, O. R. Marchuk (Svyryd), K. I. Melnyk

*Ukrainian Academy of Printing
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020 Ukraine
kolyanoslav@gmail.com*

Heat treatment (heating, drying) is an important stage of many technological processes of semi-finished or finished products. The main difficulties to intensive heat treatment of materials is the emergence of stresses that lead to degradation of the product, or even to its destruction, choosing the optimal method and mode of heating (drying) affects the quality and durability of the product, convective and conductive (contact) methods are still used in printing. The infrared (beam) method is less used due to its high cost. In the proposed article, using the method of integral Laplace transform and basis of a mathematical statement which based on the theory of thermal conductivity by O. V. Lykov, non-stationary problem of convective thermal conductivity for a single-layer plate has been solved. Then there are graphs of temperature versus time for single-layer materials that are widely used in printing, packaging, light and construction industries: cardboard, cotton, linen, polyurethane. These single-layer materials are studied to create the necessary multilayer materials (composites) with predetermined properties.

Keywords: *thermal processing, printing industry, convective heating and drying, non-stationary thermal conductivity and moisture conductivity, mathematical model, thermophysical parameters, temperature gradients.*

Стаття надійшла до редакції 14.09.2020.

Received 14.09.2020.