

УДК 539.3:681.1.05

ЧИСЕЛЬНЕ ПОРІВНЯННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО КОНВЕКТИВНОГО І КОНДУКТИВНОГО НАГРІВАННЯ ОДНОШАРОВИХ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Я. Ю. Коляно, В. М. Сеньківський, О. Р. Марчук (Свирид), К. І. Мельник

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

Запропоновано підхід до вивчення процесів теплової обробки (нагрівання, сушіння) поліграфічних матеріалів, який базується на теорії нестационарної теплопровідності та термовологопровідності. Апробація виконана для кондуктивного (контактного) та конвективного способів нагріву одношарових пластин. Наводяться і порівнюються графіки залежності температури від часу для матеріалів, виготовлених з картону, бавовни, поліуретану, поліпропілену, поліетилену, які використовуються у поліграфії, пакуванні, легкій промисловості, будівництві тощо. Ці одношарові матеріали вивчаються для створення у подальшому потрібних кількешарових матеріалів (композитів) із задалегідь заданими властивостями. Результати чисельних обчислень можуть бути рекомендовані підприємствам як поліграфічної, так й інших галузей виробництва, де використовується тепла обробка (нагрівання, сушіння). У результаті чого можлива оптимізація технологічних процесів і забезпечення потрібних якісних показників продукції.

Ключові слова: *теплова обробка, поліграфічна галузь, конвективне і кондуктивне нагрівання, нестационарна теплопровідність, математична модель, теплофізичні параметри, градієнти температури.*

Постановка проблеми. У сучасному поліграфічному виробництві використовується значна кількість як одношарових, так і кількешарових матеріалів (композитів). Під час виготовлення (на різних етапах виробництва) і експлуатації вони піддаються тепловій обробці (нагріванню, сушінню). Такими плоскопаралельними композитами в поліграфії є деякі спеціальні види паперу (крейдований папір, картографічний папір), картону (шаруватий картон, що складається з різних шарів (целюлоза, деревна маса, картон), картон із захисною плівкою, гофрокартон); сучасні пакувальні матеріали (папір-лак, папір-фольга, папір-поліетилен, асептичне тришарове пакування (картон-фольга-поліетилен); ламіновані відбитки (нанесення полімеру методом розплаву, припресування полімерних плівок); палітурні кришки (картон, клейовий шар, покрівельний матеріал); обкладинки (паперова основа і полімерне покриття); корінці книжкових блоків при вставленні книжкового блока в обкладинку; друкарські форми та ін. [2, 14, 20]. Кожен із шарів у цих композитах створюється із матеріалу з якісно іншими властивостями і має свою мету. Оптимізація процесів нагрівання та сушіння таких матеріалів є важливим і актуальним

завданням, вирішення якого дасть змогу не допустити руйнування чи псування матеріалів, покращити експлуатаційні властивості готової продукції, ефективно використовувати теплову енергію, зменшити витрати виробничого часу [17]. Передумовою (першим кроком) до розв'язання і дослідження нестационарних задач термовологопровідності (задач сушіння) для багатошарових тіл є розв'язання відповідних нестационарних задач теплопровідності (задач нагрівання) [23, 9]. Створення нових якісних композитів забезпечить економію матеріалів та зменшить масу і товщину виробів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Конвективний і кондуктивний способи теплової обробки (нагрівання, сушіння) широко використовується на різних етапах поліграфічного виробництва. Кількість теоретичних і практичних досліджень щодо конвективного способу є значною і вони далі продовжуються, особливо щодо високошвидкісної (струменевої) конвекції [25] та комбінованих способів (кондуктивно-конвективного, променево-конвективного, коли необхідно отримати менш жорсткий режим технологічного процесу [2, 11]). Кондуктивний спосіб вивчений менше, особливо щодо поліграфічних матеріалів [11, 17]. Ще менше вивчений променевий (інфрачервоний, терморадіаційний) спосіб [24, 25]. Вивчення переваг різних способів теплової обробки сприятиме правильному вибору конструкції і режиму роботи відповідних сушарок та подальшому керуванню цими процесами. У зв'язку з цим вважаємо актуальним для удосконалення технологій теплової обробки розвиток аналітичних методів дослідження процесів нагріву і сушіння, які базуються на теоріях теплопровідності та тепломасоперенесення (термовологопровідності) [13, 12, 10]. З розвитком інформаційних технологій відкриваються нові можливості дослідження згаданих вище способів теплової обробки матеріалів в поліграфічній індустрії [26, 2].

Мета статті — порівняти поведінку при нагріванні певних одношарових поліграфічних матеріалів конвективним та кондуктивним способами, щоб потім перейти до вивчення і створення потрібних кількшарових (композитних) поліграфічних матеріалів із заздалегідь заданими властивостями (кожен шар виконує свою потрібну роль). Нас цікавить виробництво і експлуатація спеціальних видів паперу і картону, палітурних кришок, паковальних матеріалів (паковань), оздоблювальної поліграфічної продукції, певною мірою військового і пожежного екіпірування [3, 4], будівельних матеріалів [18], які є дво-, три- і більше шаровими структурами (композитами). І якщо ми спочатку вивчимо нагрів і поведінку кожного одношарового потрібного матеріалу, то потім зможемо на основі цих даних формувати кількшарові структури (композитні матеріали), які будуть витримувати допустимі теплові навантаження і залишатись якісними під час виготовлення і експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Постановки нестационарних задач кондуктивної і конвективної теплопровідності здійснені на базі класичної теорії теплопровідності О. В. Ликова [13].

Фізична постановка кондуктивної задачі теплопровідності. Розглядається нескінченна пластина товщиною h , початкова температура якої t_0 (див. рис. 1).

У початковий момент часу $\tau = 0$ її верхня поверхня $z = h$ взаємодіє з навколишнім середовищем, температура якого t_c згідно із законом конвективного теплообміну, а нижня поверхня $z = 0$ нагрівається тепловим потоком q . Потрібно: знайти розподіл температури в довільній точці пластини залежно від часу; встановити величину температурних градієнтів між поверхнями пластини залежно від часу; встановити час, через який температура пластини досягне стаціонарного значення (тобто встановити час прогріву пластини) [2].

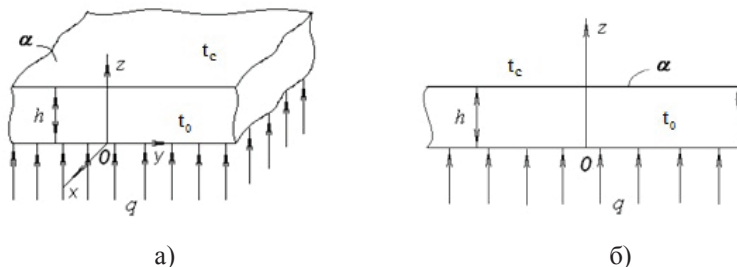


Рис. 1. Схема перерізу пластини, що кондуктивно підігрівается тепловим потоком q : а) — тривимірна; б) — двовимірна

Математична постановка кондуктивної задачі теплопровідності розглядається у вигляді нестационарної початково-крайової задачі для температури $t(z, \tau)$ [13]. Ця задача обезрозмірюється з метою мінімізації числа теплофізичних параметрів матеріалу, з якого виготовлена пластинка [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = \frac{\partial T}{\partial Fo} & Fo > 0, \quad -1 \leq Z \leq 1 & (1) \\ T(Z, Fo) = 0 & \text{при } Fo = 0, & (2) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} + Bi(T - T_c) = 0 & \text{при } Z = 1, & (3) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} = -QS_+(Fo) & \text{при } Z = 0, & (4) \end{cases}$$

де t_c, t_0 — задані величини, $T = t - t_0, T_c = t_c - t_0$; a, α, λ — коефіцієнти теплопровідності, теплообміну і теплопровідності відповідно; $Z = \frac{z}{h}, Fo = \frac{a\tau}{h^2}, Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}, Q = \frac{qh}{\lambda}, S_+(Fo) = \begin{cases} 1, & Fo > 0 \\ 0, & Fo \leq 0 \end{cases}$ — асиметрична функція Гевісайда; q — величина

поверхневої густини теплового потоку. Розв’язок задачі (1)–(4) матиме вигляд [2]:

$$T(Z, Fo) = T_c + \frac{Q}{Bi} [1 + Bi(1 - Z)] - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ T_c \cos \mu_n Z + \frac{Q}{Bi} \left[\cos \mu_n (1 - Z) + \frac{Bi \sin \mu_n (1 - Z)}{\mu_n} \right] \right\} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (5)$$

де $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$, μ_n — корені певного характеристичного рівняння. Зауважимо, що при $Fo \rightarrow \infty$ із останнього рівняння отримуємо стаціонарне значення температурного поля

$$T_{cm}(Z) = \lim_{Fo \rightarrow \infty} T(Z, Fo) = T_c + \frac{Q}{Bi} [1 + Bi(1-Z)]. \quad (6)$$

За потреби розв'язок (5) можна переписати в розмірному вигляді [2]:

$$t(z, \tau) = t_c + \frac{q}{\alpha} \left[1 + \frac{\alpha}{\lambda} (h-z) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ (t_c - t_0) \cos \mu_n \frac{z}{h} + \frac{q}{\alpha} \left[\cos \mu_n \frac{h-z}{h} + \frac{\alpha h}{\lambda} \frac{\sin \mu_n \frac{h-z}{h}}{\mu_n} \right] \right\} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{h^2}}. \quad (7)$$

Фізична постановка конвективної задачі теплопровідності. Розглядається необмежена пластина товщиною $2h$, початкова температура якої t_0 (див. рис. 2). У початковий момент часу $\tau = 0$ нагрівання пластини здійснюється середовищем із температурою t_c . Верхня і нижня поверхні пластини взаємодіють із навколишнім середовищем згідно із законом конвективного теплообміну.

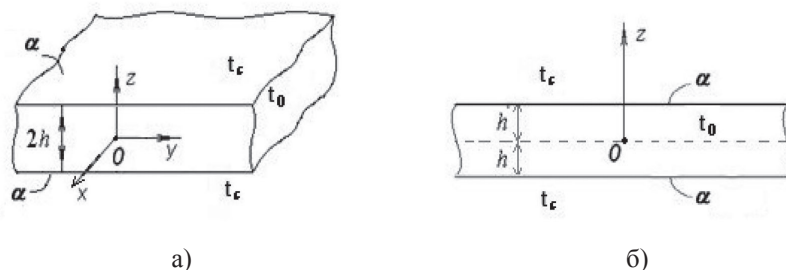


Рис. 2. Схема перерізу пластини, що конвективно нагрівається теплим повітрям температури t_c : а) — тривимірна; б) — двовимірна

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) [15, 20].

Математична постановка конвективної задачі теплопровідності розглядається у вигляді нестационарної початково-крайової задачі для температури $t(z, \tau)$ [13]. Ця задача обезрозмірюється з метою мінімізації числа теплофізичних параметрів матеріалу, з якого виготовлена пластина [15, 20]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = \frac{\partial T}{\partial Fo}, \quad Fo > 0, \quad -1 \leq Z \leq 1 \quad (8) \\ T(Z, Fo) = 0, \quad \text{при} \quad Fo = 0, \quad (9) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} + Bi(T - T_c) = 0, \quad \text{при} \quad Z = 1, \quad (10) \\ \frac{\partial T}{\partial Z} - Bi(T - T_c) = 0, \quad \text{при} \quad Z = -1, \\ \frac{\partial T}{\partial Z} = 0, \quad \text{при} \quad Z = 0 \text{ - умова симетрії,} \quad (11) \end{array} \right.$$

де $T = t - t_0$, $T_c = t_c - t_0$, t_c, t_0 — задані величини; a, α, λ — коефіцієнти теплопроводності, теплообміну і теплопроводності відповідно; $Z = \frac{z}{h}$, $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$, $Fo = \frac{a\tau}{h^2}$.

Розв’язок задачі (8)–(11) запишеться у безрозмірному вигляді так [15, 20]:

$$T(Z, Fo) = T_c \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n Z e^{-\mu_n^2 Fo} \right), \quad (12)$$

де $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$, μ_n — корені певного характеристичного рівняння. Зауважимо, що при $Fo \rightarrow \infty$ із останнього рівняння отримуємо стаціонарне значення безрозмірного температурного поля [15, 20]:

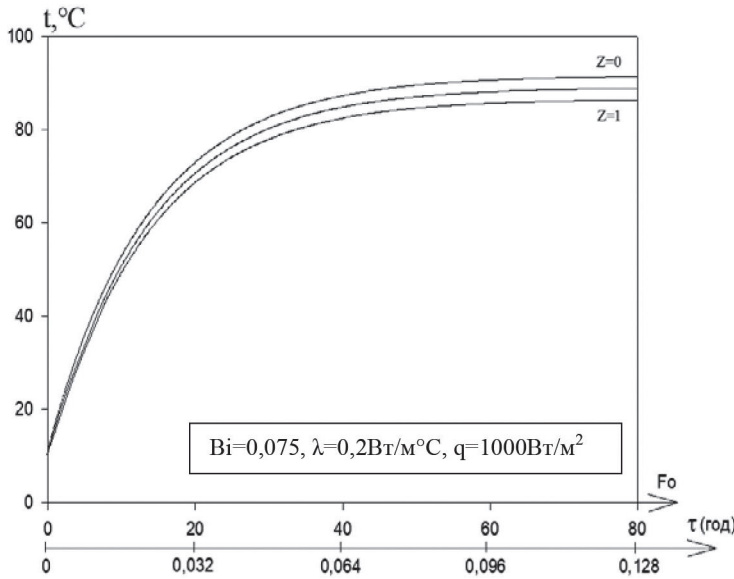
$$T_{cr}(Z) = \lim_{Fo \rightarrow \infty} T(Z, Fo) = T_c. \quad (13)$$

Чисельний експеримент. Для визначення поведінки температури в різних точках пластини залежно від часу як для кондуктивного, так і для конвективного способу нагріву здійснені чисельні обрахунки за допомогою формул (5), (12) в середовищі алгоритмічної мови Fortran. Приймаємо, що пластина виготовлена з картону ($\lambda = 0,2 \text{ Bm} / (m^{\circ}C)$, $a = 0,174 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / c$, $\alpha \approx 15 \text{ Bm} / (m^2 \text{ } ^{\circ}C)$ [2]); або бавовни ($\lambda = 0,042 \text{ Bm} / (m^{\circ}C)$, $a = 0,49 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / c$, $\alpha = 15 \text{ Bm} / (m^2 \text{ } ^{\circ}C)$) [1]; або поліуретану ($\lambda = 0,026 \text{ Bm} / (m^{\circ}C)$, $a = 0,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / c$, $\alpha = 10 \text{ Bm} / (m^2 \text{ } ^{\circ}C)$) [5, 2]; або поліпропілену ($\lambda = 0,1 \text{ Bm} / (m^{\circ}C)$, $a = 0,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / c$, $\alpha = 10 \text{ Bm} / (m^2 \text{ } ^{\circ}C)$) [6–8]; або поліетилену ($\lambda = 0,3 \text{ Bm} / (m^{\circ}C)$, $a = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 / c$, $\alpha \approx 10 \text{ Bm} / (m^2 \text{ } ^{\circ}C)$) [27, 8]. У публікації [15] наведені певні (зокрема температурні) властивості цих розглянутих матеріалів, з яких виготовлена пластина. Вхідні температурні параметри такі: 1) для кондуктивного способу нагріву: $t_0 = +10^{\circ}C$, $t_c = +20^{\circ}C$, $q = 1000 \text{ Вт/м}^2$; 2) для конвективного: $t_0 = +10^{\circ}C$, $t_c = +80^{\circ}C$. Ці вхідні температурні параметри відповідають виробничим і експериментальним [22, 16, 3, 21].

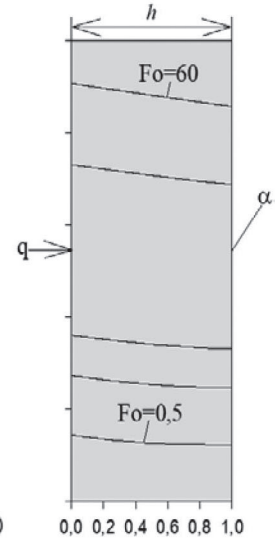
На графіках (рис. 3–9) продемонстровано весь перехідний (нестационарний) процес кондуктивного та конвективного нагрівання пластин різних матеріалів аж до виходу температури на стаціонарне (усталене) значення. Для кондуктивного способу спостерігаємо за трьома поверхнями пластини: $Z = 0$ ($z = 0$) — нижня

поверхня, $Z = 0,5$ ($z = h/2$) — серединна поверхня, $Z = 1$ ($z = h$) — верхня (зовнішня) поверхня (див. рис. 1). Температура нижньої поверхні пластини $Z = 0$, порівняно із верхньою поверхнею $Z = 1$, з початку процесу нагрівання зростає швидше (див. рис. 3–7, а). Градієнти температури з ростом часу теж зростають, досягаючи максимальних значень в кінці прогріву, тобто з виходом температури на стаціонарне значення (див. рис. 3–7, а). Для конвективного способу спостерігаємо за трьома поверхнями пластини: $Z = 0$ ($z = 0$) — серединна поверхня, $Z = 0,5$ ($z = h/2$) — поверхня рівновіддалена від верхньої та серединної, $Z = 1$ ($z = h$) — верхня (зовнішня) поверхня (див. рис. 2). Динаміка процесу нагрівання тут інша. Температура верхньої (зовнішньої) поверхні $Z = 1$, порівняно із серединною поверхнею $Z = 0$, з початку процесу нагріву зростає швидше, але максимальні градієнти температури виникають не в кінці, а на початку нагрівання (див. рис. 3–7, в). Зі збільшенням товщини пластини як для кондуктивного, так і для конвективного способу нагрівання збільшуються градієнти температури і час прогріву пластини (див. рис. 8–9). Отже, характер поведінки температурного поля в пластині для кондуктивного і конвективного нагрівання в часі докорінно відрізняються. Небезпечні градієнти температури в кондуктивному способі виникають в кінці нагріву (див. рис. 3–9, а), а в конвективному на початку нагріву (див. рис. 3–9, в). Крім того, розподіл температури по перерізу пластини для конвективного нагрівання має вигляд симетричної параболи (див. рис. 3–9, г), а для кондуктивного — зміщеної параболи (див. рис. 3–9, б).

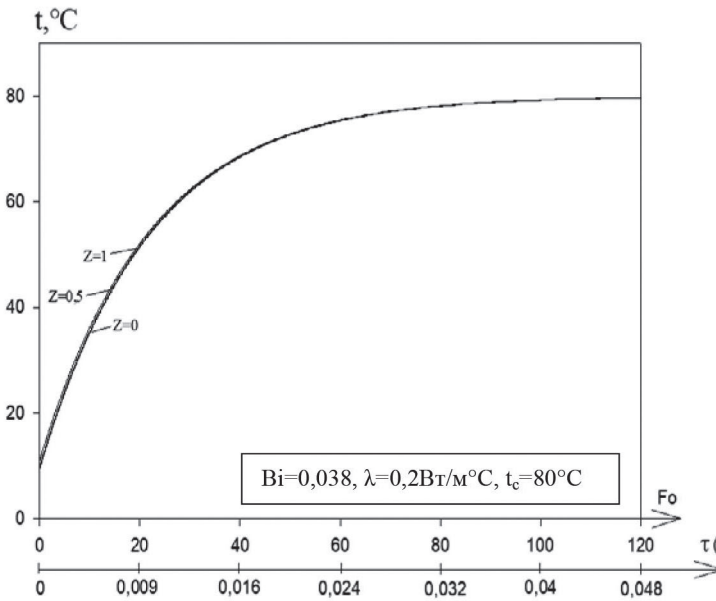
Також спостерігаємо з графіків (рис. 3–9), що введений в математичну модель критерій Bi є величиною, яка характеризує міру масивності тіла (ефект Г. П. Іванцова [19]), тобто, якщо $Bi < 0,25$, то тіло вважається тонким — виникають незначні градієнти температури, якщо $Bi \geq 0,25$, то тіло вважається масивним — виникають значні градієнти температури [19, 2, 10, 15]. Наприклад, картон товщиною 1 мм при кондуктивному і конвективному способі нагріву (див. рис. 3, а, в) веде себе як тонке тіло — градієнти температури незначні (відповідно $Bi = 0,075 < 0,25$ і $Bi = 0,038 < 0,25$). Бавовна і поліуретан товщиною 1 мм (див. рис. 4, а, в, рис. 5, а, в) при кондуктивному способі ведуть себе як масивні тіла — градієнти температури значні (відповідно $Bi = 0,357 > 0,25$ і $Bi = 0,385 > 0,25$), а при конвективному способі ведуть себе як тонкі тіла — градієнти незначні (відповідно $Bi = 0,179 < 0,25$ і $Bi = 0,192 < 0,25$). Поліуретан товщиною 5 мм (див. рис. 9) при кондуктивному і конвективному способі нагріву веде себе як масивне тіло — градієнти великі ($Bi = 1,9 > 0,25$, $Bi = 0,96 > 0,25$). Отже, ефект Г. П. Іванцова отримав подальше продовження на картон, бавовну, поліуретан, поліпропілен, поліетилен. Крім того, з цих графіків видно, що чим менший коефіцієнт теплопровідності λ матеріалу, тим він краще затримує тепло (тобто тим він кращий теплоізолятор — виникають більші температурні градієнти).



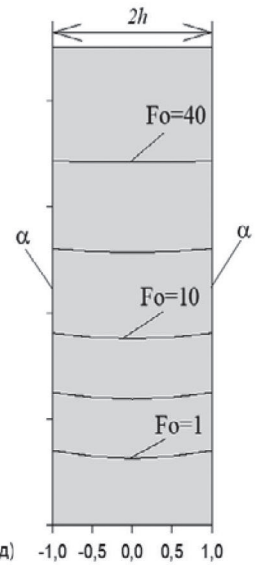
а)



б)

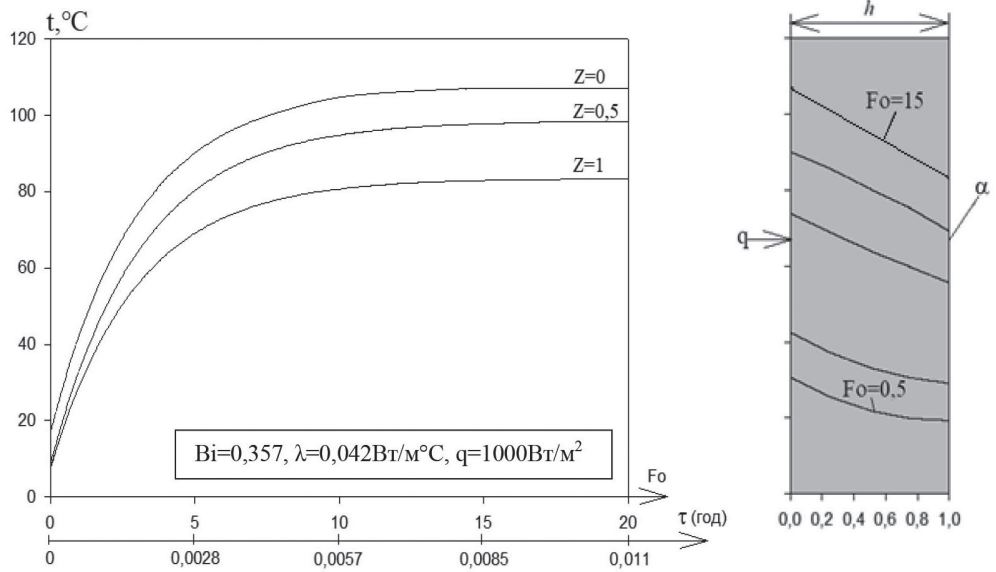


в)



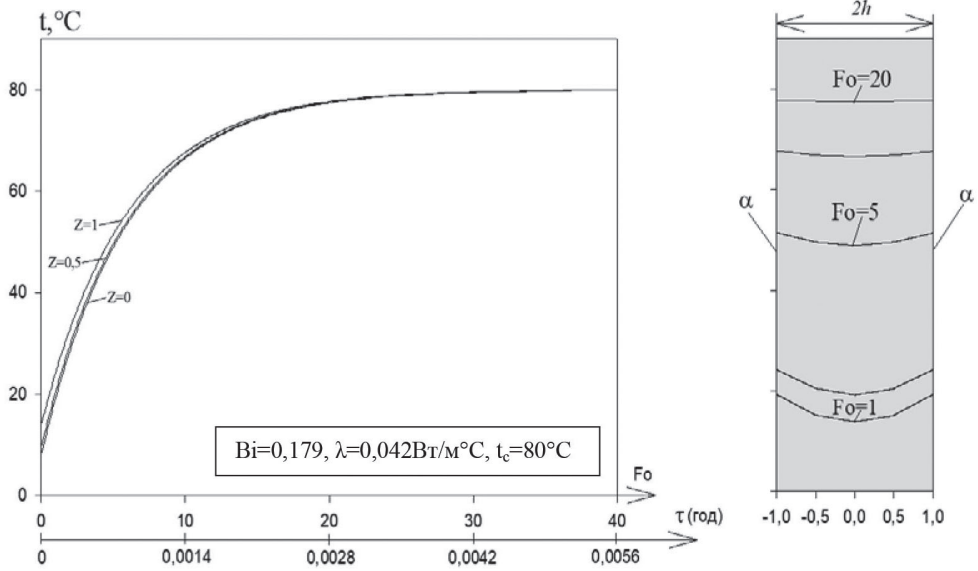
г)

Рис. 3. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективному способах підведення тепла до картонних пластин товщиною 1 мм: а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластини



а)

б)

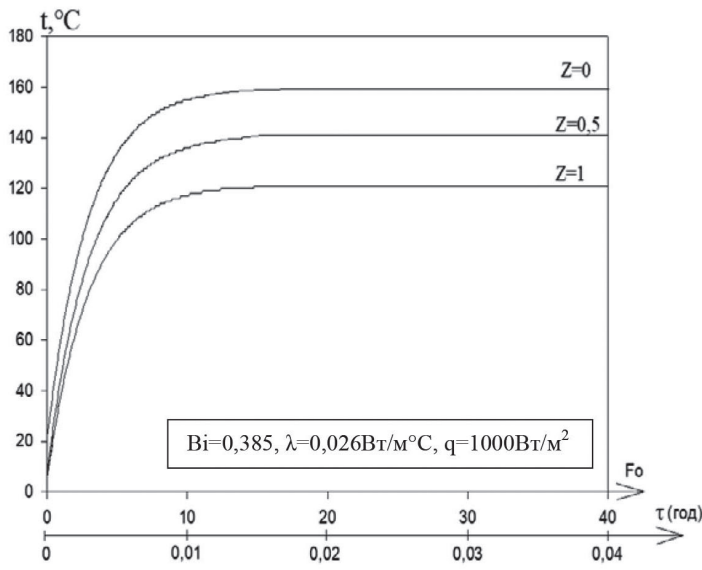


в)

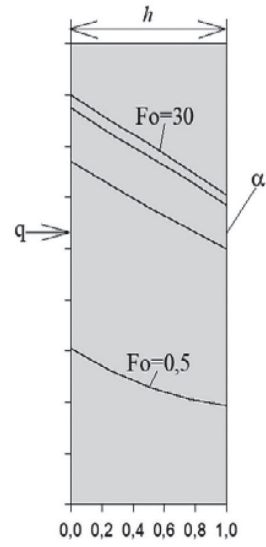
г)

Рис. 4. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективному способах підведення тепла до бавовняних пластин товщиною 1 мм:

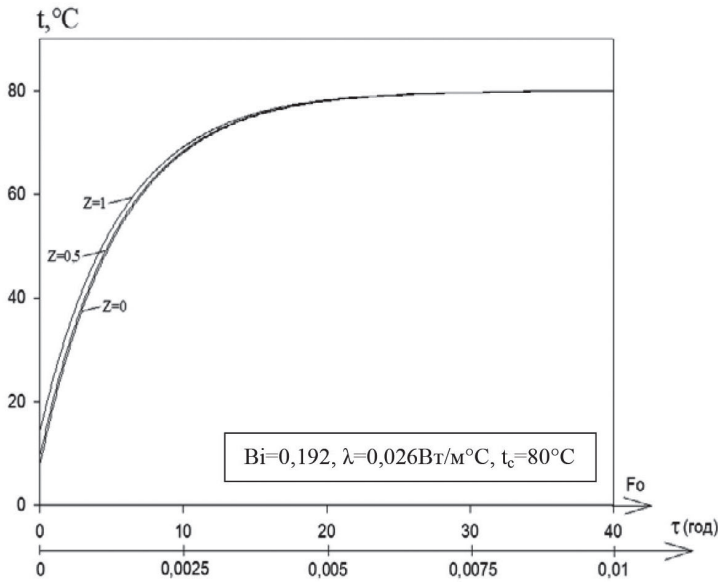
а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластини



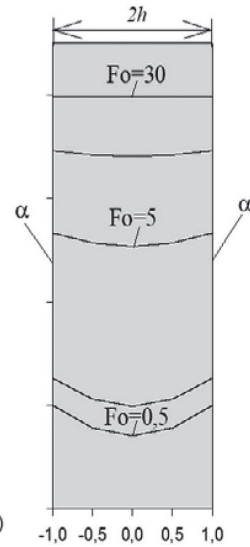
а)



б)



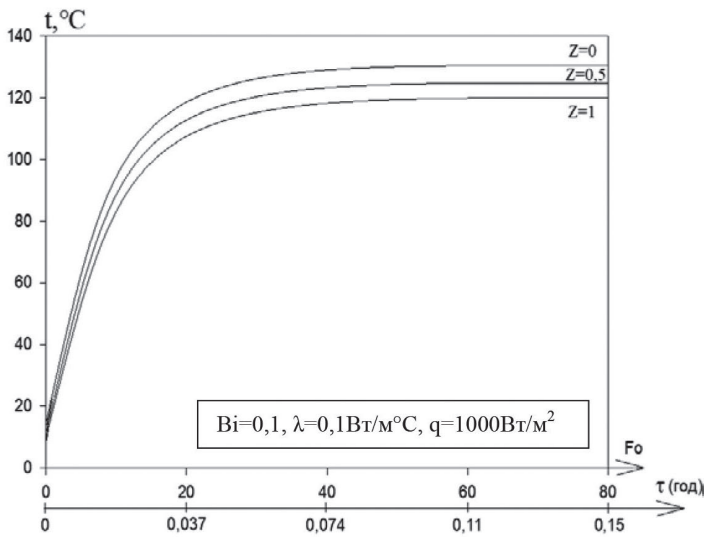
в)



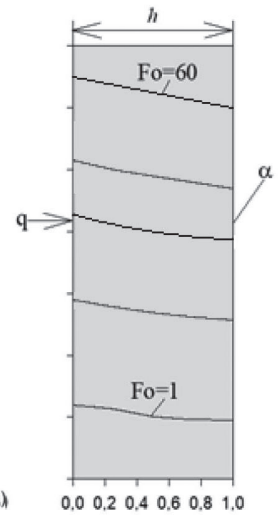
г)

Рис. 5. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективному способах підведення тепла до поліуретанових пластин товщиною 1 мм:

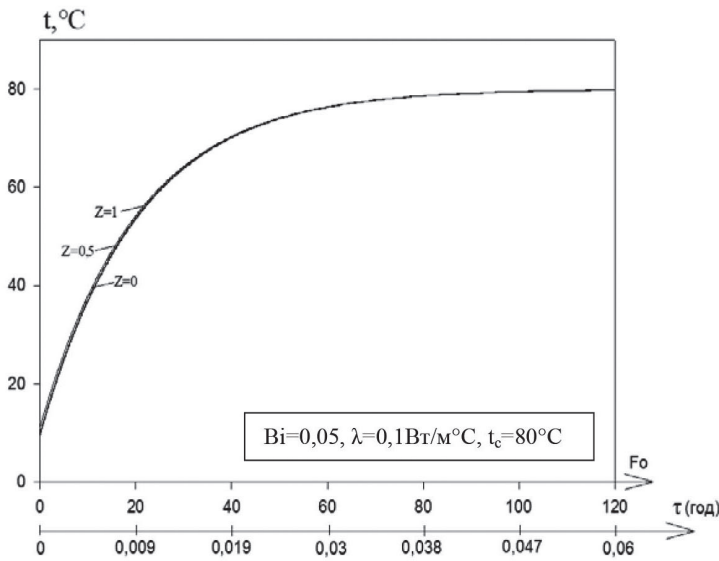
а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластини



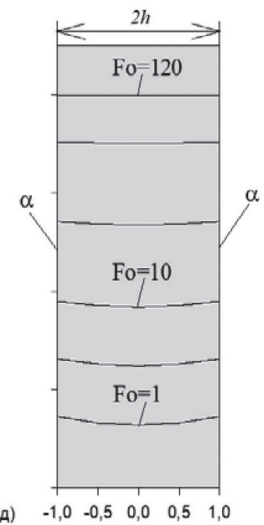
а)



б)



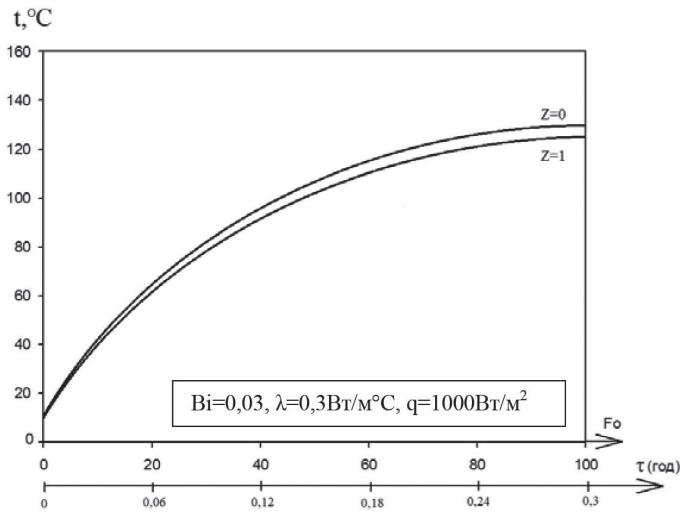
в)



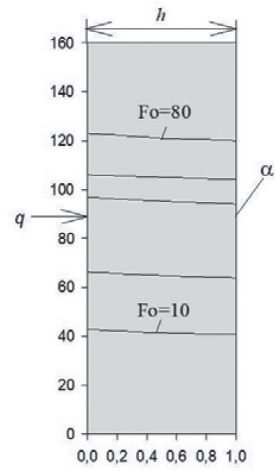
г)

Рис. 6. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективному способах підведення тепла до поліпропіленових пластин товщиною 1 мм:

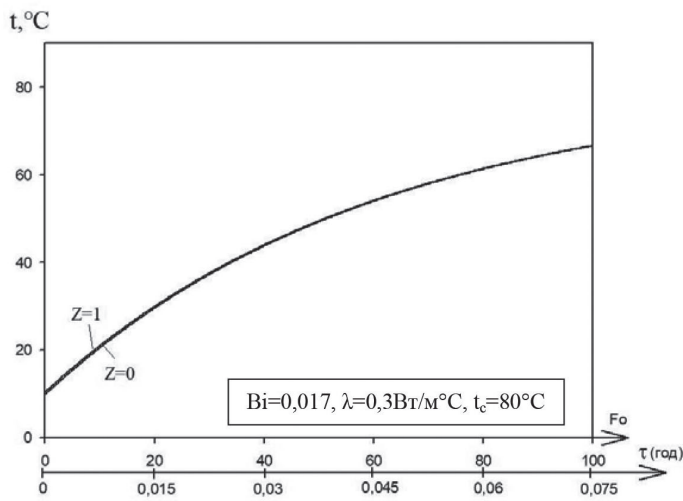
а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластини



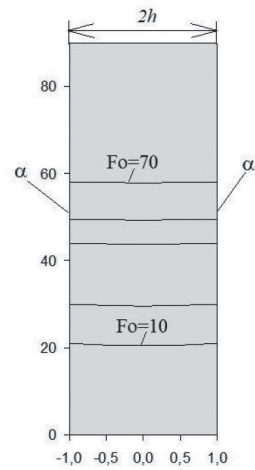
а)



б)

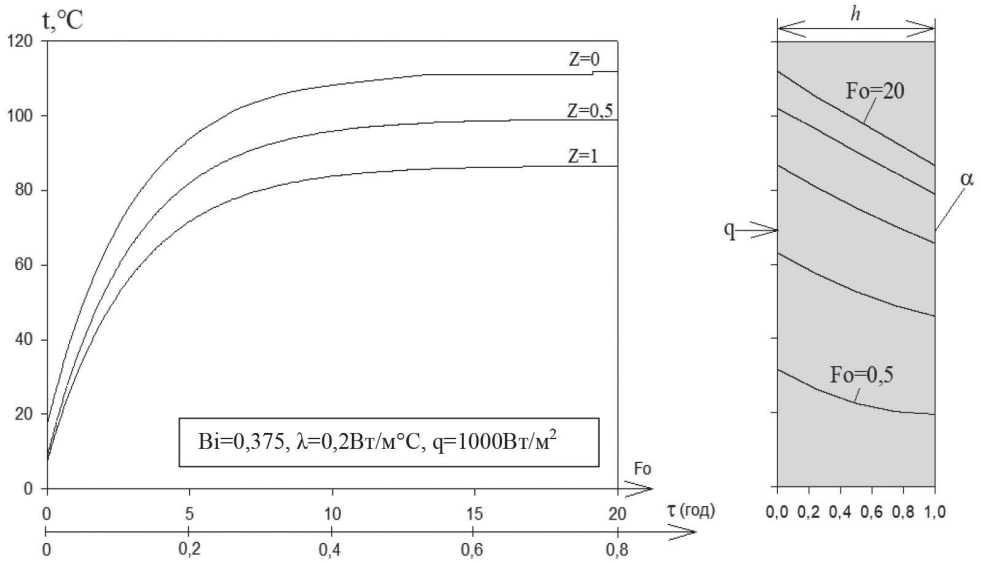


в)



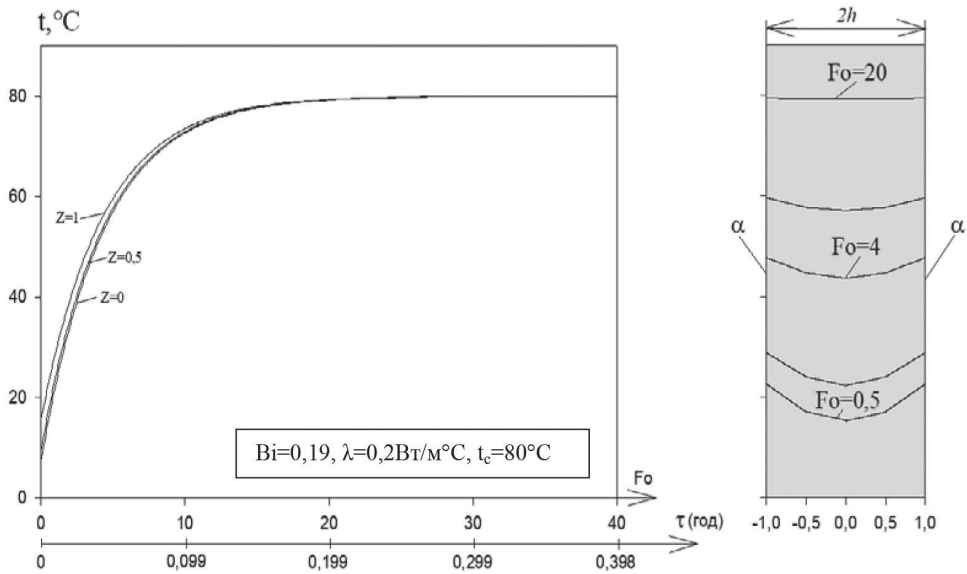
г)

Рис. 7. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективного способах підведення тепла до поліетиленових пластин товщиною 1 мм:
а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластини



а)

б)

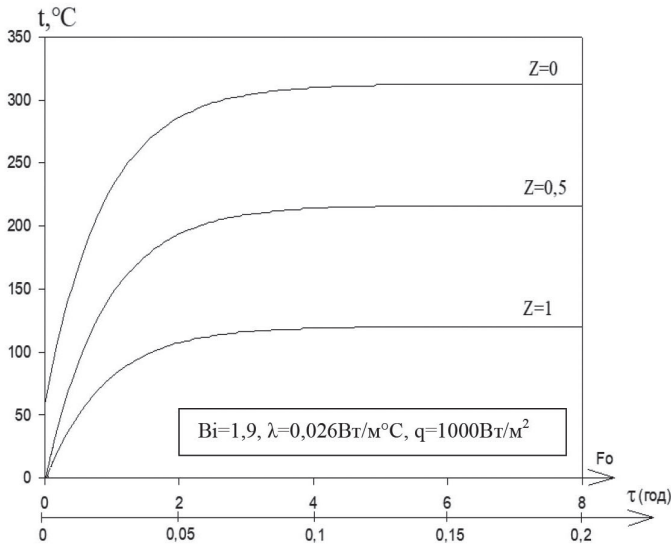


в)

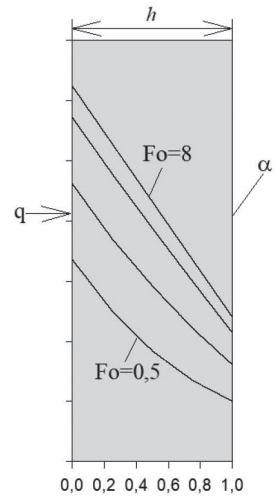
г)

Рис. 8. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективному способах підведення тепла до картонних пластин товщиною 5 мм:

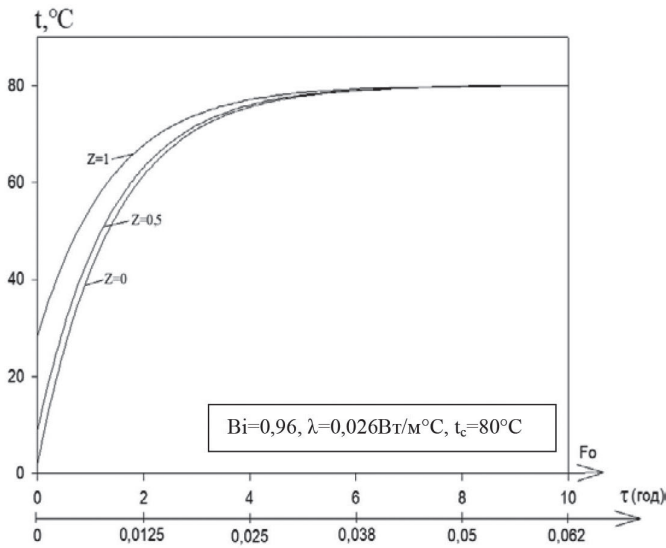
а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластини



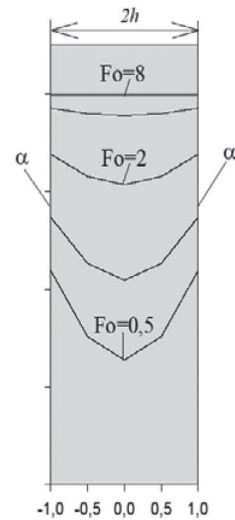
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Розподіли температури в часі при кондуктивному і конвективному способах підведення тепла до поліуретанових пластин товщиною 5 мм:

а), в) — залежно від часу; б), г) — по товщині пластин

Висновки. 1. За допомогою розв'язаних нестационарних задач конвективної і кондуктивної теплопровідності та розроблених відповідних програмних засобів (модулів) створено відповідні графіки поведінки температури залежно від часу для таких поліграфічних матеріалів, як картон, бавовна, поліуретан, поліпропілен, поліетилен. Уточнено теплофізичні параметри картону, бавовни та полімерів, що дало змогу змодельовати процеси нестационарних конвективного і кондуктивного нагрівання цих матеріалів різної товщини. Розглянуті задачі корисні для вивчення в часі процесів теплової обробки (нагрівання, сушіння) поліграфічної продукції, коли підвід тепла здійснюється конвективним чи кондуктивним способом. Наприклад, сушіння картону, паперу, текстильних матеріалів, палітурних кришок, корінців книжкових блоків тощо.

2. Зроблено порівняння чисельних результатів (графіків) для конвективної нестационарної задачі з аналогічною кондуктивною нестационарною задачею. Характер поведінки температурного поля для конвективного і кондуктивного нагрівання в часі докорінно відрізняється. Розподіл температури по перерізу пластини для конвективного нагрівання має вигляд симетричної параболи, а для кондуктивного — зміщеної параболи. Це добре узгоджується з відомими у літературі теоретичними і практичними дослідженнями [13, 16, 2]. Динаміка процесу по нестационарних графіках спостерігається в перехідні моменти часу (тобто до прогріву пластини). Небезпечні градієнти температури в кондуктивному способі виникають в кінці нагріву, а в конвективному на початку нагріву.

3. За допомогою отриманих графіків видно, що як за кондуктивного, так і за конвективного нагріву 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. Крім того, чим більша товщина пластини, тим довший час виходу температури на стаціонар, тобто пластини довше прогрівається.

4. Підтверджено чисельними обрахунками, що картон, бавовна, а особливо поліуретан — хороші теплоізоляційні матеріали, бо добре затримують тепло. З графіків видно, що чим менший коефіцієнт теплопровідності λ матеріалу, тим він краще затримує тепло (тобто тим він кращий теплоізолятор). 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 $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$ дає змогу, згідно з його величиною, 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 під час нагрівання масивних пластин (при значеннях $Bi \geq 0,25$) виникають значні градієнти температури, а під час нагрівання тонких (при значеннях $Bi < 0,25$) — незначні. Для інженера-технолога це означає, що по

величині V_i можна визначити чи будуть виникати небезпечні температурні градієнти (напруження) в пластині чи ні.

6. Математичне моделювання процесу нагрівання та вивчення поведінки різних способів нагріву розглянутих потрібних матеріалів дають змогу розробляти нові композиційні матеріали із заздалегідь заданими властивостями. Аналіз отриманих графіків дає змогу підібрати оптимальний режим нагрівання, що позитивно вплине на якість матеріалів та їх експлуатаційні властивості. Розроблені програмні пакети дають можливість побачити на графіках температурні градієнти та час виходу температури на стаціонар (час прогріву пластини). Підбір комбінацій матеріалів, з яких виготовлений композит, дасть змогу зменшити його товщину і масу без втрати потрібних властивостей виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва : Энергоиздат, 1981. 416 с.
2. Сасс Т. С. Інформаційні технології удосконалення процесів сушіння поліграфічних матеріалів : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. 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., Жерносок С. В., Ольшанский В. И. Графоаналитический метод расчета конвективно-терморadiационной сушки технических тканей. Вестник Витебского государственного технологического университета. 2014. Вып. 26. С. 74–84.
5. Ильинский В. М. Строительная теплофизика. Москва : Высшая школа, 1974. 320 с.
6. Новиченок Н. Л., Шульман З. П. Теплофизические свойства полимеров. Минск : «Наука и техника», 1971. 120 с.
7. Свойства полимеров: теплопроводность и плотность пластиков и пластмасс. URL: <http://thermalinfo.ru>.
8. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины. Справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
9. Коляно Я. Ю., Свирид О. Р., Бабич О. Є. Нестационарна задача теплопроводності для двошарової пластини щодо конвективного сушіння поліграфічної продукції. Звітна наук.-техн. конференція проф.-викл. складу, наукових працівників і аспірантів УАД за 2017 рік: тези доп. (лют. 2018 р.). Львів, 2018. С. 123.
10. Коляно Я. Ю., Сасс Т. С., Иваник Е. Г. Моделирование кондуктивной сушки полиграфических материалов капиллярно-пористой коллоидной структуры. Инженерно-физический журнал. Минск, 2018. 91. № 5. С. 1231–1241.
11. Воробьев Д. В., Дубасов А. И., Лебедев Ю. М. Технология брошюровочно-переплетных процессов. Москва : Книга, 1989. 392 с.
12. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. Москва : Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
13. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва : Высшая школа, 1967. 599 с.

14. Моделювання теплової обробки одно- та кількшарових матеріалів у поліграфічних процесах / Коляно Я. Ю., Стрепко І. Т., Свирид О. Р., Бабич О. Є., Мельник К. І. Комп'ютерні технології друкарства. 2019. № 1 (41). С. 102–115.
15. Дослідження процесу нестационарного конвективного нагрівання одношарових поліграфічних матеріалів / Коляно Я. Ю., Стрепко І. Т., Марчук (Свирид) О. Р., Мельник К. І. Комп'ютерні технології друкарства. 2020. № 1 (43). С. 97–115.
16. Лыков А. В. Теория сушки. Москва : Энергия, 1968. 472 с.
17. Шот Р. І., Стрепко І. Т. Теплові процеси в поліграфії : навч. посіб. Львів : УАД «Фенікс», 1998. 202 с.
18. Федосов С. В., Ибрагимов А. М. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях. Строительные материалы. 2006. № 4. С. 86–87.
19. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки : підруч. Київ : А.С.К., 2005. 480 с.
20. Свирид О. Р. Математичне моделювання конвективної теплової обробки одно- та двошарових поліграфічних матеріалів : маг. робота. Львів : УАД, 2020. 120 с.
21. Шолота К. В. Інтесифікація процесу сушіння композитних деревинних матеріалів : автореф. дис. канд. техн. наук. Львів : Український державний лісотехнічний університет, 1998, 19 с.
22. Иванов С. Н. Технология бумаги. Москва : «Московская типография № 2», 2006. 696 с.
23. Коляно Я. Ю., Сасс Т. С. Нестационарна задача теплопроводності для двошарової плити щодо сушіння поліграфічної продукції. Комп'ютерні технології друкарства. 2009. № 21. С. 226–234.
24. Гавенко С. Ф., Йордан Г. М. Технологія мікрохвильового висушування книжкових блоків. Львів : УАД, 2012. С. 144.
25. Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition. Boca Raton (USA), 2015. 1333 p.
26. Інформаційні технології формування якості книжкових видань : монографія / Піх І. В., Дурняк Б. В., Сеньківський В. М., Голубник Т. С. Львів : УАД, 2017. 308 с.
27. Бабич О. Є. Нестационарні задачі теплопроводності для одно- та двошарової пластини щодо конвективної та кондуктивної теплової обробки поліграфічних матеріалів : маг. робота. Львів : УАД, 2020. 102 с.

REFERENCES

1. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., & Sukomel, A. S. (1981). *Teploperedacha*. Moskva : Jenergoizdat (in Russian).
2. Sassi, T. S. (2015). *Informatsiini tekhnologii udoskonalennia protsesiv sushinnia polihrafichnykh materialiv : dys. ... kand.. tekhn.. nauk. : 05.13.06*. Lviv (in Ukrainian).
3. Ol'shanskij, A. I. (2014). Reguljarnyj teplovoj rezhim nagrevanija vlazhnyh ploskih kapilljarno-poristykh materialov v processe ih sushki: *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 87, 6, 1308–1318 (in Russian).
4. Ol'shanskij, A. I., Zhernosek, S. V., & Ol'shanskij, V. I. (2014). Grafoanaliticheskij metod rascheta konvektivno-termoradiacionnoj sushki tehniceskikh tkanej: *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta*, 26, 74–84 (in Russian).
5. Il'inskij, V. M. (1974). *Stroitel'naja teplofizika*. Moskva : Vysshaja shkola (in Russian).

6. Novichenok, N. L., & Shul'man, Z. P. (1971). *Теплофизические свойства полимеров*. Минск : «Наука и техника» (in Russian).
7. *Svoystva polimerov: teploprovodnost' i plotnost' plastikov i plastmass*. Retrieved from <http://thermalinfo.ru> (in Russian).
8. Babichev, A. P., Babushkina, N. A., & Bratkovskij, A. M. i dr. (1991). *Fizicheskie velichiny. Spravochnik / pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlihova*. Moskva : Jenergoatomizdat (in Russian).
9. Kolyano, Ya. Yu., Svyryd, O. R., & Babych, O. Ye. (2018). Nestatsionarna zadacha teploprovodnosti dlia dvosharovoї plastyny shchodo konvektyvnoho sushinnia polihrafichnoi produktsii. *Zvitna nauk.-tekh. konferentsiia prof.-vykl. skladu, naukovykh pratsivnykiv i aspirantiv UAD za 2017 rik : tezy dop. (liut. 2018 r.)*. Lviv, 123 (in Ukrainian).
10. Kolyano, Ja. Ju., Sass, T. S., & Ivanik, E. G. (2018). Modelirovanie konduktivnoj sushki poligraficheskikh materialov kapilljarno-poristoj kolloidnoj struktury: *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. Minsk, 91, 5, 1231–1241 (in Russian).
11. Vorob'ev, D. V., Dubasov, A. I., & Lebedev, Ju. M. (1989). *Tehnologija broshjurovochno-pe-repletnyh processov*. Moskva : Kniga (in Russian).
12. Lykov, A. V., & Mihajlov, Ju. A. (1963). *Teorija teplo- i massoperenosa*. Moskva : Gosjenergoizdat (in Russian).
13. Lykov, A. V. (1967). *Teorija teploprovodnosti*. Moskva : Vysshaja shkola (in Russian).
14. Kolyano, Ya. Yu., Strepko, I. T., Svyryd, O. R., Babych, O. Ye., & Melnyk, K. I. (2019). Modeliuvannia teplovoi obrobky odno- ta kil'kasharovykh materialiv u polihrafichnykh protsesakh: *Komp'uterni tekhnologii druzarstva*, 1 (41), 102–115 (in Ukrainian).
15. Kolyano, Ya. Yu., Strepko, I. T., Marchuk (Svyryd), O. R., & Melnyk, K. I. (2020). Doslidzhennia protsesu nestatsionarnoho konvektyvnoho nahrivannia odnosharovykh polihrafichnykh materialiv: *Komp'uterni tekhnologii druzarstva*, 1 (43), 97–115 (in Ukrainian).
16. Lykov, A. V. (1968). *Teorija sushki*. Moskva : Jenergiia (in Russian).
17. Shot, R. I., & Strepko, I. T. (1998). *Teplovi protsesy v polihrafiї*. Lviv : UAD «Feniks» (in Ukrainian).
18. Fedosov, S. V., & Ibragimov, A. M. (2006). Nestacionarnyj teplo- i massoperenos v mnogoslojnyh ograzhdajushchih konstrukcijah: *Stroitel'nye materialy*, 4, 86–87 (in Russian).
19. Tkachenko, O. O. (2005). *Vysokotemperaturni protsesy ta ustanovky*. Kyiv : A.S.K. (in Ukrainian).
20. Svyryd, O. R. (2020). *Matematyčne modeliuvannia konvektyvnoi teplovoi obrobky odno- ta dvosharovykh polihrafichnykh materialiv*. Lviv : UAD (in Ukrainian).
21. Sholota, K. V. (1998). *Intesyfikatsiia protsesu sushinnia kompozytnykh derevnynykh materialiv : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk*. Lviv : Ukrainyski derzhavnyi lisotekhnichniy universytet (in Ukrainian).
22. Ivanov, S. N. (2006). *Tehnologija bumagi*. Moskva : «Moskovskaja tipografija № 2» (in Russian).
23. Kolyano, Ya. Yu., & Sass, T. S. (2009). Nestatsionarna zadacha teploprovodnosti dlia dvosharovoї plyty shchodo sushinnia polihrafichnoi produktsii: *Komp'uterni tekhnologii druzarstva*, 21, 226–234 (in Ukrainian).
24. Havenko, S. F., & Yordan, H. M. (2012). *Tekhnologii mikrokhvylovoho vysushuvannia knyzhkovykh blokiv*. Lviv : UAD, 144 (in Ukrainian).

25. Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition. Boca Raton (USA), 2015. 1333 p. (in English).
26. Pikh, I. V., Durniak, B. V., Senkivskiy, V. M., & Holubnyk, T. S. (2017). Informatsiini tekhnolohii formuvannia yakosti knyzhkovykh vydan. Lviv : UAD (in Ukrainian).
27. Babych, O. Ye. (2020). Nestatsionarni zadachi teploprovodnosti dlia odno- ta dvosharovoi plastyny shchodo konvektyvnoi ta konduktyvnoi teplovoi obrobky polihrafichnykh materialiv. Lviv : UAD (in Ukrainian).

doi: 10.32403/0554-4866-2020-2-80-81-99

NUMERICAL COMPARISON OF NON-STATIONARY CONVECTIVE AND CONDUCTIVE HEATING OF SINGLE-LAYER PRINTING MATERIALS

Ya. Yu. Kolyano, V. M. Senkivskyy, O. R. Marchuk (Svyryd), K. I. Melnyk

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

The main obstacle to intensive heat treatment (heating drying) of materials is the emergence of strainings that leads to product degradation, or even to its destruction. A significant difference in the values of the temperature and moisture fields is the causes of high temperature stresses and deformations during heating. An important technological factor in the heating of various materials is the preservation of the form in forthcoming technological operations. That is why, the choice of mode parameters of the heating process (drying) - temperature and speed of the coolant – is important in determining the technological mode in specific production conditions. The convective method along with the conductive (contact) method is widely used in printing industry. The number of theoretical and practical studies on the convective method is significant and they continue, especially on high-speed (jet) convection and combined methods (conductive-convective, ray-convective). The conductive method is less studied, especially for printing materials. The radiation (infrared) method is even less studied and still less used due to its high cost. The study of the advantages of different methods of heat treatment will facilitate the correct choice of dryers design and mode of operation, taking into account the characteristics of the dried material. This will improve the quality, durability and preserve the biological value of the product.

In this paper a new approach is suggested to the study of heat treatment processes (heating, drying) of certain printing materials, based on the theory of non-stationary thermal conductivity by O. V. Lykov. The approbation is performed for conductive (contact) and convective method of heating single-layer plates. The graphs of temperature dependence on time for materials made of cardboard, cotton, polyurethane, polypropylene, polyethylene used in printing, packaging, light and construction industries, etc. are presented and compared. These single-layer materials are studied to create the necessary multilayer materials (composites) with predetermined properties.

The results of numerical analysis can be recommended to enterprises in both printing and other industries, which use heat treatment (heating, drying). As a result, it is possible to optimize technological processes and ensure the required quality of products.

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

Стаття надійшла до редакції 23.09.2020.

Received 23.09.2020.