

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ ТЕПЛОВОЛОГОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ КАРТОНУ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ

На основі дослідження нестационарної задачі термовологопровідності пропонується підхід до вивчення в часі конвективного сушіння картону. За допомогою отриманих графіків досліджується поведінка нестационарних полів температури і вологовмісту в процесі конвективного сушіння картону різної товщини.

The approach for studying of carton convective drying offered based on investigations of time-depended task of thermohumidityconductivity. The conduct of time-depended fields of temperature and humidity content during process of convective drying of carton with different sizes investigates by received drawings.

1. ВСТУП

Найпоширенішими у поліграфії є конвективний, кондуктивний (контактний) і променевий (терморадіаційний) способи сушіння. Вибір цих способів сушіння залежить від технології обробки напівфабрикатів і виробів, а також від економічної доцільності даного методу сушіння в конкретних виробничих умовах [3, 21]. Також використовуються комбіновані методи сушіння (контактно-конвективний, конвективно-променевий тощо) [3, 12, 21].

Конвективне сушіння широко застосовується при висушуванні капілярно-пористих колоїдних тіл (дерево, картон, папір, целюлоза, торф). Цей спосіб сушіння забезпечує "м'який режим" (малі значення температури та градієнтів температури і вологовмісту виключають руйнування структури матеріалу). Застосовується він у випадках, коли тривалість процесу не має суттєвого значення. Наприклад, у деревообробній промисловості за різними даними з усього сушильного обладнання, що використовується в Україні, 90–95% становлять сушарки конвективного типу [1]. Важливе значення конвективний спосіб сушіння має у поліграфічному виробництві. Наприклад, при виробництві: паперу, картону [6], палітурних кришок [8, 15, 21], обкладинок [20], лакованих чи ламінованих друкованих відбитків [4, 8, 17], сучасних пакувальних матеріалів [4, 20], при крейдуванні і проклеюванні паперу [6] та ін.

²⁶ Українська академія друкарства

Запропонований у цій роботі підхід до розв'язання задачі конвективного сушіння вологої пластини (запропонована математична модель) може бути застосований до вивчення інших складніших інтенсивніших способів сушіння поліграфічної продукції: кондуктивного і променевого, які можна досліджувати надалі [9]. Безпосередній підвід тепла і високий градієнт температури при кондуктивному способі забезпечують високу швидкість сушіння тонких матеріалів, яка може бути на один-два порядки вищою від швидкості конвективного сушіння [3, 21]. Кондуктивний спосіб підводу тепла використовується, наприклад, при припресуванні полімерних плівок [4], контактному обігріві корінця книжкового блоку [3, 21], сушінні відбитків у багатофарбових машинах глибокого друку [21], виробництві паперу і картону (барабанний спосіб), крейдуванні або проклеюванні паперу [6]. Механізм переносу тепла і вологи кондуктивним і конвективним способами сушіння матеріалів корінним чином відрізняються [13]. Криві розподілу температури і вологовмісту залежно від координати для конвективного способу підводу тепла мають вигляд симетричної параболи (див. тут рис. 2-4), для контактного способу – зміщеної параболи [16, 18].

При променевому (терморадіаційному) сушінні підведення енергії до матеріалу проходить від генераторів інфрачервоного випромінювання. Ними є звичайні лампи розжарювання, випромінювачі з кварцовими трубками, керамічні випромінювачі, панельні металічні випромінювачі, газополум'яні випромінювачі та ін. [19]. Так сушать, наприклад, лаковані відбитки, полімерні покриття, палітурні кришки, корінці книжкових блоків тощо [3, 21]. Цим способом можна сушити майже всю поліграфічну продукцію [3]. Час сушіння інфрачервоними променями в кілька разів (а іноді в десятки разів) менший, ніж у конвективних сушарках [19].

Велика кількість матеріалів, що висушуються у поліграфії є кількочастковими тілами, тобто композитами [11, 21]. Зокрема, композитами, що сушаться в поліграфії є: палітурні кришки (картон, клейовий шар, покрівельний матеріал) [3, 8, 21]; обкладинки (паперова основа і полімерне покриття) [4, 8]; ламіновані та лаковані відбитки (нанесення полімеру методом розплаву, припресування полімерних плівок) [4]; сучасні пакувальні матеріали (папір-лак, папір-фольга, папір-поліетилен тощо) [20]; шаруватий картон (складається з різних шарів (целюлоза, деревна маса, картон) [6]; певні види паперу (крейдований папір (паперова основа та покриття на основі крейди чи каніфолі); картографічний папір) [6]; певні друкарські форми (полімерні та фотополімерні друкарські форми на основі металу, гуми та полімеру) [8, 21]. Для сушіння згаданих композитів широко застосовують конвективний, кондуктивний і променевий способи підводу тепла.

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.

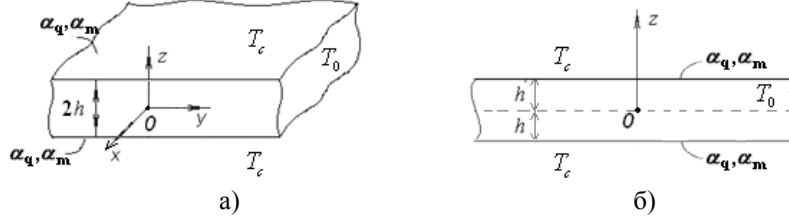


Рис. 1. Схема перерізу пластини, що конвективно підігрівається теплим повітрям: а) тривимірна; б) двовимірна

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

певного характеристичного рівняння; $T = \frac{t - T_0}{T_c - T_0}$, $\Theta = \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 - \theta_p}$,

$$Z = \frac{z}{h}, \quad Fo = \frac{a_q \tau}{h^2}, \quad Bi_q = \frac{\alpha_q h}{\lambda_q}, \quad Bi_m = \frac{\alpha_m h}{\lambda_m} = \frac{\beta h}{a_m}, \quad Lu = \frac{a_m}{a_q},$$

$$Ko = \frac{r(U_0 - U_p)}{c_q(T_c - T_0)}, \quad Pn = \frac{\delta(T_c - T_0)}{U_0 - U_p}, \quad \varepsilon - \text{критерій фазового перетворення; } a_q, a_m - \text{коєфіцієнти температуропроводності і потенціалопровідності вологопереносу, } \alpha_q, \alpha_m - \text{коєфіцієнти теплообміну і вологообміну, } \lambda_q, \lambda_m - \text{коєфіцієнти теплопровідності і вологопровідності, } \delta - \text{термоградієнтний коєфіцієнт, } c_q - \text{теплоємність матеріалу, } r - \text{питома теплота фазового переходу, } T_0, T_c - \text{початкова температура пластини і температура оточуючого середовища, } \theta_0, \theta_p - \text{початкове і рівноважне значення потенціалу вологопереносу, } U_0, U_p - \text{початковий і рівноважний вологовміст пластини [14]. Зв'язок потенціалу вологопереносу і вологовмісту задається співвідношенням } \theta = \frac{U}{U_{i\bar{a}}} 100,$$

де U – вологовміст матеріалу, $U_{i\bar{a}}$ – максимальний гігроскопічний вологовміст матеріалу [13].

Для обрахунків розв'язок (1), (2) переписуємо 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) в середовищі алгоритмічної мови Fortran і з одержаних графіків хочемо визначити: 1) поведінку температури і вологовмісту залежно від часу у різних точках пластини і, в результаті, вихід температури і вологовмісту на стаціонарне (стале) і рівноважне значення відповідно; 2) виникнення і поведінку в часі градієнтів температури і вологовмісту для картонних пластин різної товщини. Термодинамічні параметри для картону приймалися такі: $\delta = 0,25 \cdot 10^{-2} 1/^\circ C$, $\beta = 5 \cdot 10^{-6} i / \tilde{n}$, $\lambda_q = 0,14 \hat{A} \hat{\delta} / (i \ ^\circ \tilde{N})$, $c_q = 1,51 \hat{e} \hat{A} \hat{\alpha} / (\hat{e} \hat{\alpha} \tilde{N})$, $a_q = 1,22 \cdot 10^{-7} i^2 / \tilde{n}$ [7], $\alpha_q = 13 \hat{A} \hat{\delta} / (i^2 \ ^\circ \tilde{N})$, $a_m = 0,9 \cdot 10^{-7} i^2 / \tilde{n}$, $T_0 = 10^\circ C$, $T_c = 80^\circ C$, $U_0 = 0,4 \hat{e} \hat{\alpha} / \hat{e} \hat{\alpha} (\theta_0 = 181^\circ \hat{A})$, $U_p = 0,15 \hat{e} \hat{\alpha} / \hat{e} \hat{\alpha} (\theta_p = 68^\circ \hat{A})$, $h = 10 \hat{i}$. $\varepsilon = 0,05$ [12], $r = 2256 \hat{e} \hat{A} \hat{\alpha} / \hat{e} \hat{\alpha}$ [5].

На графіках рисунків 2–4 продемонстровано весь перехідний (не-стаціонарний, несталий) процес висушування картонних пластин (плит) різної товщини 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 картону відрізняється. Для температурних графіків ми спостерігаємо зменшення градієнтів зі зменшенням товщини. Для товщини 20 мм виникають незначні температурні градієнти, тоді як для товщини 5 мм і 1 мм їх практично немає. Вологовмісні градієнти також зменшуються зі зменшенням товщини пластини, але навіть при товщині 1 мм є доволі значними порівняно із температурними. Це означає, що небажані напруження та деформації в таких картонних пластинах викликать не температурні, а вологовмісні градієнти. Температура картонної пластини (плити) товщиною 20 мм виходить на стаціонар через $\approx 4,5$ години; товщиною 5 мм – через $\approx 1,1$ год., товщиною 1 мм – через $\approx 0,12$ год. Час виходу на рівноважний вологовміст становить: для товщини 20 мм ≈ 6 год., для 5 мм $\approx 1,2$ год., для 1 мм $\approx 0,12$ год.

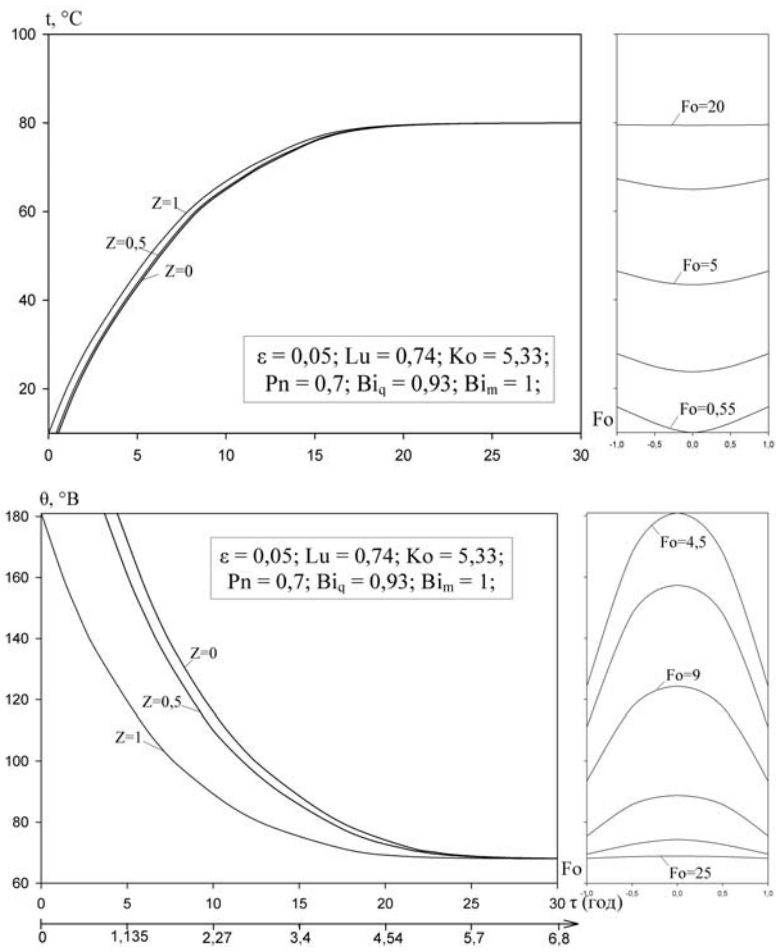


Рис. 2. Розподіл температури та потенціалу вологопереносу в часі при конвективному сушінні картонної пластини товщиною $2h=20$ мм:

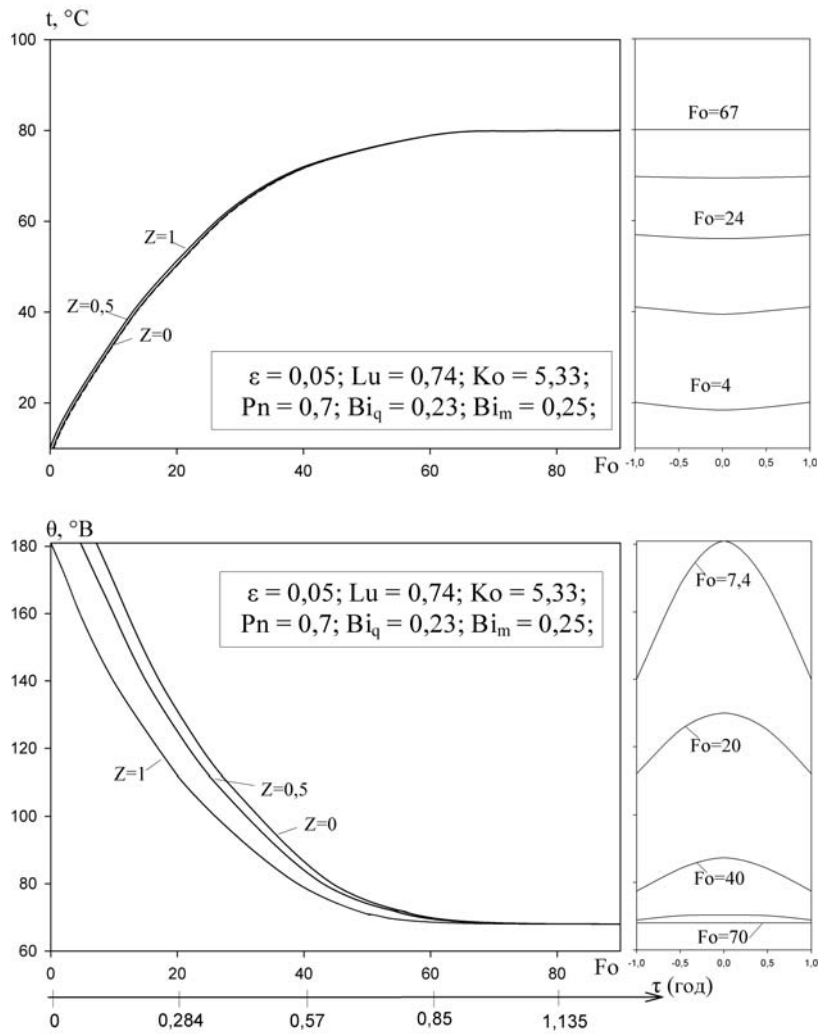


Рис. 3. Розподіл температури та потенціалу вологопереносу в часі при конвективному сушінні картонної пластини товщиною $2h=5$ мм

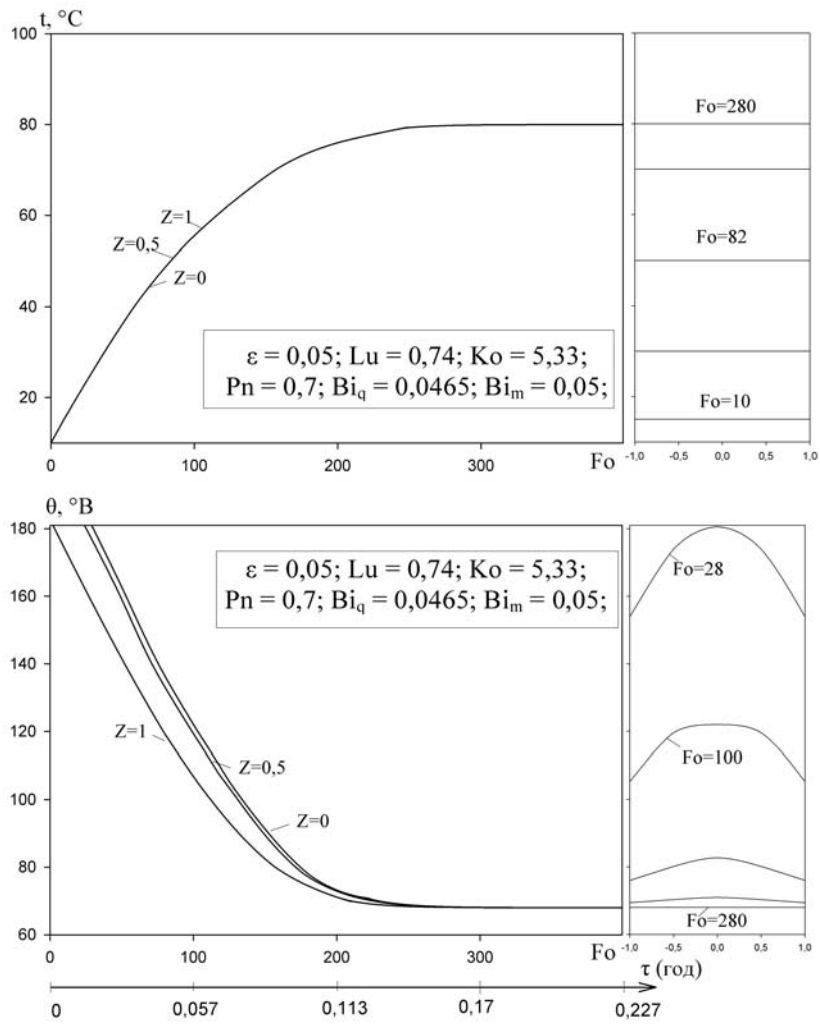


Рис. 4. Розподіл температури та потенціалу вологопереносу в часі при конвективному сушінні картонної пластини товщиною $2h=1$ мм

4. ВИСНОВКИ

1. Проведеними числовими дослідженнями встановлено, що під час розглянутого процесу конвективного сушіння виникають градієнти температури та вологовмісту, які можуть призвести до псування висушуваного матеріалу (наприклад, жолоблення). При зменшенні товщини пластини (плити) вологовмісні градієнти мають більший вплив на виникнення деформацій і напружень порівняно із температурними.

2. Розглянута задача корисна для вивчення процесу сушіння поліграфічної продукції, коли підвід тепла здійснюється конвективним чи комбінованими способами (контактно-конвективним, конвективно-променевим) 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. Шахельдян. – 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, 2013. – №29. – С.206-213. 11. Коляно Я. Ю., Сасс Т. С. Нестационарна задача теплопровідності для двошарової плити щодо сушіння поліграфічної продукції [Текст] / Я. Ю. Коляно, Т. С. Сасс // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. праць. – Львів: УАД, 2009. – №. 21. – С. 226-234. 12. Красников В. В. Кондуктивная сушка. – М.: Энергия, 1973. – 288 с. 13. Лыков А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с. 14. Лыков А. В. Теория тепло- и мас-

сопереноса [Текст] / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.:Госэнергоиздат, 1963.– 535с. 15. Майк В. З. Технологія брошурувально-палітурних процесів [Текст] / В. З. Майк.– Львів:УАД, 2011.–488 с. 16. Озарків І.М. Діагностика властивостей деревини в технологічних процесах деревообробки / І.М. Озарків, Є.В. Басалига, Я.Ф. Кулешник, І.А. Соколовський, М.С. Кобринович.–Львів:Вид. дім «Панорама», 2003.– 228 с. 17. Репета В. Б. Матеріали і технології лакування поліграфічної продукції [Текст] / В.Б. Репета, В.В. Шибанов.–Львів:УАД, 2011.–135 с. 18. Сажин Б. С. Основы техники сушки [Текст] / Б. С. Сажин.– М.: Химия, 1984 - 320 с. 19. Стрєпко І.Т. Порівняльний аналіз методів теплового сушіння матеріалів [Текст] / І.Т. Стрєпко, Б. І. Федина // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. праць.-Львів: УАД, 2002.-№. 7.-С. 216-220. 20. 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. 21. Шот Р. І. Теплові процеси в поліграфії [Текст] / Р. І Шот, І. Т. Стрєпко. – Львів:УАД, 1998.–202с 22. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г. С. Шубин.– М.:Лесн. пром-сть, 1990.– 336с.