

УДК 676.2.065.5

# Кінетика нагрівання картону

В.М. Марчевський, к.т.н., Л.Г. Воронін, к.т.н., А.З. Кравчук,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

## Постановка проблеми

Тара із гофрокартону займає stále місце на українському і міжнародному ринках, що стимулює швидке зростання кількості підприємств та об'ємів виробництва гофрокартону. Виробництво гофрокартону досить енергоємне. Нагрівання картону здійснюють шляхом його контакту з поверхнею порожнистих валів, які нагріваються паром високого тиску. Тепловий коефіцієнт корисної дії цих пристроїв досить низький — 65–70 %. Наукові засади розрахунку параметрів нагрівання картону і шляхи вирішення проблеми заощадження енергії в літературі висвітлено недостатньо. Тому дослідження кінетики нагрівання картону, створення науково обґрунтованої методики розрахунку параметрів нагрівання і вирішення проблеми заощадження енергії є актуальними завданнями.

Метою даного дослідження є встановлення кінетичних закономірностей нагрівання картону, необхідних для розробки методики розрахунку параметрів нагрівальних пристроїв.

## Фізична модель нагрівання картону

Нагрівання картону проводиться на нагрівальних валах (утюгах), які представляють собою порожністі вали діаметром до 1 м. Вали нагріваються паром, яка подається у внутрішню порожнину утюга під тиском до 1,4 МПа. Картон, який розмотується з рулону, контактує з нагрітою поверхнею вала під натягом, що створюється поворотними валами. Під час переміщення картону по поверхні вала відбувається його інтенсивне нагрівання.

Нагрівання картону включає такі стадії:

- тепловіддачу від конденсації пари до внутрішньої поверхні вала;
- передачу тепла теплопровідністю через стінку вала до її зовнішньої поверхні;
- передачу тепла теплопровідністю від зовнішньої поверхні вала до картону з його наступним нагріванням;
- тепловіддачу від зовнішньої поверхні картону в навколишнє середовище.

Аналіз цих стадій показує, що критичною стадією є контактна передача тепла від зовнішньої поверхні вала до картону. У результаті такої передачі тепла картон нагрівається і одночасно віддає частину теплової енергії в навколишнє середовище внаслідок конвективної тепловіддачі. Через те що поверхня картону не ізолювана і він рухається із значною швидкістю, ці втрати є досить великими.

## Математична модель нагрівання картону

Нагрівання картону можна описати законами Фур'є та Ньютона — Ріхмана.

Базуючись на цих законах, розроблено математичну модель нагрівання картону, яка включає:

– рівняння нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right),$$

де  $t$  — температура картону, °C;

$\tau$  — тривалість нагрівання, с;

$r$  — товщина картону, м;

$a$  — коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

– початкові умови:

$$\tau = 0, t = t_{\text{поч.}} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}, \varphi_0 = 68^\circ,$$

$$\varphi_{\kappa} = 292^\circ, t_{\text{к.с.}} = 24 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– граничні умови:

• I-го роду:

$$t_{\text{вала}} = \text{const} = 164 \text{ } ^\circ\text{C};$$

• III-го роду:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_{\text{нов.}}(t - t_{\text{н.с.}}),$$

де  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності картону, Вт/(м·К);

$t_{\text{н.с.}}$  — температура навколишнього середовища, °C;

$\alpha_{\text{нов.}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{нов.}}}{D}$  — коефіцієнт тепловіддачі для повітря Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda_{\text{нов.}}$  — коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К) [1];

$Nu = 0,07 \cdot Re^{0,75}$  — число Нусельта [1];

$D$  — діаметр вала, м;

$Re = \frac{V \cdot l}{\nu_{\text{нов.}}}$  — число Рейнольдса;

$\nu_{\text{нов.}}$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м<sup>2</sup>/с;

$V$  — швидкість переміщення картону в гофроагрегаті, м/с;

$l = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi_{\text{max}}}{360}$  — довжина дуги обхвату

вала картоном, м;

$\varphi_{\text{max}}$  — максимальний кут обхвату вала картоном, градуси.

Рівняння вирішено числовим методом сіток, в основі якого лежить заміна (апроксимація) похідних кінцевими різницевиими відношеннями. Результати розрахунків зміни температури картону по його товщині на ділянці нагрівання у перетинах (рис. 1) зображено на рис. 2.

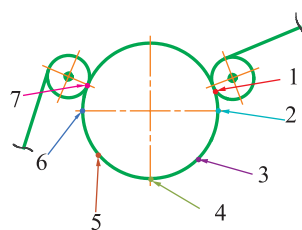


Рис. 1. Схема розташування місць вимірювання температури картону на промисловому нагрівальному валу

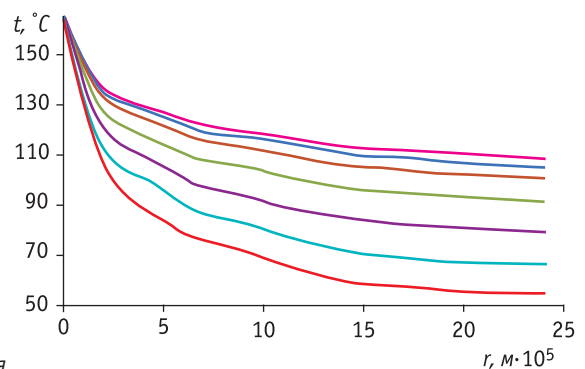


Рис. 2. Зміна температури картону по його товщині відповідно до місць її вимірювання (рис. 1)

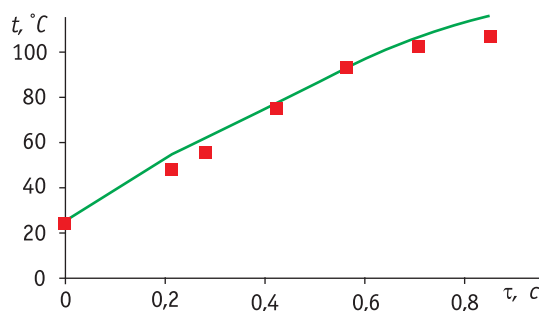


Рис. 3. Залежність температури нагрівання картону від часу нагрівання (■ експеримент; — розрахунок)

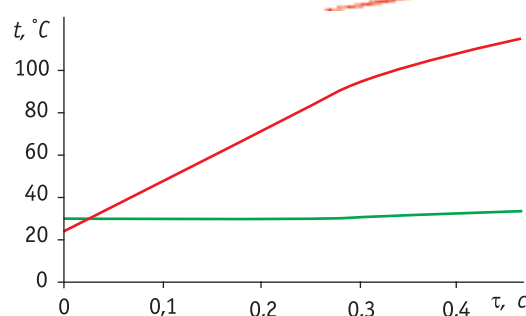


Рис. 5. Залежність температури нагрівання картону (—) і набивного сукна (—) від часу нагрівання

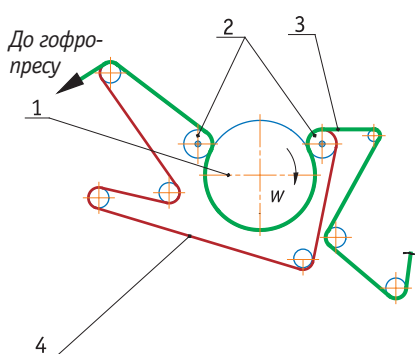


Рис. 4. Схема пристрою для нагрівання картону: 1 — нагрівальний вал, 2 — приводні поворотні вали, 3 — картон, 4 — сукно

Аналіз результатів розрахунку показує, що протягом усього часу нагрівання перепад температур по товщині картону змінюється за степеневим законом. Різниця температур між поверхнею нагрівання картону і температурою його зовнішньої поверхні досить значна. Її величина змінюється від  $\Delta t_n = 107,069^\circ\text{C}$  на початку нагрівання до  $\Delta t_k = 54,763^\circ\text{C}$  у кінці нагрівання. Такий значний перепад температур можна пояснити низькою теплопровідністю картону і втратами тепла зовнішньою поверхнею картону в результаті конвективної тепловіддачі в навколишнє середовище.

### Перевірка адекватності моделі

Досліди проведені на діючому гофроагрегаті Жидачівського целюлозно-паперового комбінату, який містить нагрівальний вал діаметром  $D = 0,9$  м. Випробування проводилися за швидкості проходження картону на агрегаті  $V = 2,5$  м/с і сталої температури поверхні вала  $164^\circ\text{C}$ . Досліджувалося нагрівання картону (лайнера) товщиною  $0,24$  мм і масою  $1\text{ м}^2$   $175$  г. Вимірю-

вання проводилися переносним вимірювачем температури фірми «Тера» моделі ІТП 30101, КТ  $0,2\%$ .

Результати експериментальних досліджень порівняно з теоретичними розрахунками приведені на рис. 3.

З рис. 3 видно, що експериментальні дані з достатньою точністю (середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 3,21$ ) описують результати дослідів [2].

Виконані розрахунки показують, що відкрита поверхня картону, який нагрівається на робочій поверхні вала, віддає в навколишнє середовище від  $6$  до  $9\%$  тепла. Щоб зменшити втрати тепла запропоновано закрити зовнішню поверхню картону на ділянці нагрівання набивним сукном, яке рухається із швидкістю руху картону і більш щільно притискає картон до поверхні вала (рис. 4).

Така конструкція дає можливість зменшити час нагрівання картону (рис. 5) порівняно з даними на рис. 3 або зменшити тиск пари за незмінного часу нагрівання. Крім того, зменшується конвективна тепловіддача в навколишнє середовище в результаті низької температури сукна (рис. 5).

Розрахований економічний ефект від збільшення питомої теплоти конденсації внаслідок зменшення тиску водяної пари від  $1,4$  до  $1$  МПа і зменшення конвективної тепловіддачі в навколишнє середовище в результаті ізоляції набивним сукном на один нагрівальний вал становить більше  $30$  тис. грн у рік.

### Висновки

1. Розроблено математичну модель, що описує кінетичні закономірності нагрівання картону і дає змогу методом чи-

сельного інтегрування визначити час нагрівання картону, необхідний для конструювання нагрівальних пристроїв.

2. Запропоновано модернізацію пристрою для нагрівання картону, який дозволяє зменшити витрати тепла на нагрівання.

3. Розраховано температурні параметри нагрівання картону з набивним сукном на модернізованому пристрої.

### Література

1. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве / П.А. Жучков. — М.: Лесн. пром-сть, 1978. — 408 с.
2. Пилипчук М.І. Основи наукових досліджень: Підручник / А.С. Григор'єв, В.В. Шостак: — К.: Знання, 2007. — 270 с.

#### Кінетика нагрівання картону

В.Н. Марчевский, к.т.н., Л.Г. Воронин, к.т.н., А.З. Кравчук

На основе анализа литературных источников в статье разработана математическая модель процесса нагревания картона на нагревательных валах гофроагрегата, которая дает возможность рассчитать время нагревания, необходимое для расчета размеров валов. Адекватность модели проверена авторами на действующем гофроагрегате Жидачевского ЦБК.

Ключевые слова: гофроагрегат; картон; нагревание; нагревательный вал.

#### Kinetics of heating of cardboard

V.M. Marchevsky, Ph.D., L.H. Voronin, Ph.D., A.Z. Kravchuk  
Based on the analysis of literary sources the mathematical model of process of heating of a cardboard is developed on the heater shaft of corrugator, which allows to expect time of heating, necessary for the calculation of sizes of shafts. Model adequacy is tested on the operating corrugator of Zhydachiv's CPF.

Key words: corrugator; a cardboard; heating; heater shaft.