

УДК 676.026.522

МАРЧЕВСЬКИЙ В. М., к.т.н., проф.; НОВОХАТ О. А., ст. викл.;  
ВОРОНІН Л. Г., к.т.н., доц.; ТАТАРЧУК О. О., магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## СУШІННЯ САНІТАРНО-ГІГІЄНИЧНОГО ПАПЕРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Наведено результати дослідження сушіння санітарно-гігієнічного паперу з використанням інфрачервоного випромінювання. Запропоновано модель, що описує змінення вологовмісту й температури з часом.

**Ключові слова:** сушіння, інфрачервоне випромінювання, санітарно-гігієнічний папір, вологовміст, кінетика.

© Марчевський В. М., Новохат О. А., Воронін Л. Г., Татарчук О. О., 2015.

**Постановка проблеми.** Під час сушіння санітарно-гігієнічного паперу використовують великогабаритне, металоемне та енергозатратне обладнання, що витрачає значні об'єми природного газу на нагрівання теплоносія (повітря) для конвективної складової. Одним з недоліків такого обладнання є низька інтенсивність теплообміну та значні втрати тепла з димовими газами порівняно з більш ефективним радіаційним способом сушіння, за якого нагрівання паперу відбувається у всьому об'ємі. Тому дослідження кінетичних закономірностей сушіння санітарно-гігієнічного паперу з використанням інфрачервоного випромінювання й визначення параметрів, необхідних для розроблення промислового обладнання, є актуальним.

**Аналіз попередніх досліджень.** Теоретичні основи радіаційно-конвективного сушіння закладені А. Ликовим [1]. Для опису відповідного механізму запропоновано диференціальне рівняння, що враховує інфрачервоне випромінювання як внутрішнє джерело теплоти:

$$c\rho_0 \frac{dt}{d\tau} = \text{div}(\lambda \nabla t) + \varepsilon r \rho_0 \frac{du}{d\tau} + Q_v.$$

Із заглибленням у матеріал потужність джерела  $Q_v$  швидко спадає. Для одновимірної задачі  $Q_v/Q_{v0} = \exp[-k(R-x)]$ , де  $Q_{v0}$  – потужність потоку випромінювання, що поглинається поверхнею [1]. У товстих шарах  $Q_v$  прямує до нуля, тому її варто враховувати не в диференціальному рівнянні, а в межовій умові  $(\lambda \nabla t)_n + \alpha(t_c - t_n) + q_r - rj_2 = 0$ , де  $q_r = Q_v R_v$  – густина потоку випромінювання, що поглинається тілом.

Застосування рівняння А. Ликова для сушіння картону наведено в праці [2]. Наукових праць з кінетики сушіння санітарно-гігієнічного паперу не виявлено.

**Метою статті** є визначення кінетичних закономірностей сушіння санітарно-гігієнічного паперу з використанням інфрачервоного випромінювання.

**Виклад основного матеріалу.** Особливістю санітарно-гігієнічного паперу є його невелика товщина (10...30 мкм). Можна припустити, що температурний профіль в елементарному шарі паперу є безградієнтним. Тоді тепловий баланс:

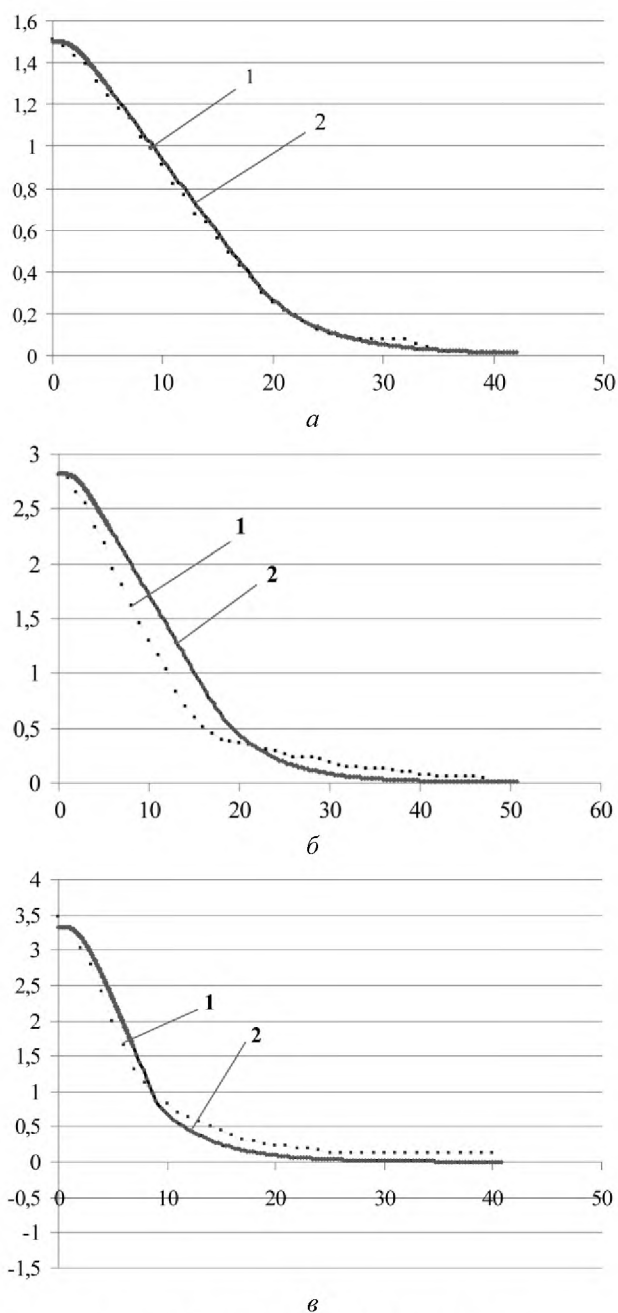
$$dQ = m[(c_{\text{асп}} + c_b u) dt] = q_r d\tau + rm \frac{du}{d\tau} d\tau, \quad \text{звідки} \quad \frac{dt}{d\tau} = \frac{q_r + rm \frac{du}{d\tau}}{m(c_{\text{асп}} + c_b u)},$$

де  $m$  – маса 1 м<sup>2</sup> абсолютно сухого паперу;  $c_{\text{асп}}$  – питома масова теплоємність абсолютно сухого паперу;  $c_b$  – питома масова теплоємність води;  $u$  – вологовміст паперу;  $t$  – температура паперу під час сушіння;  $r$  – питома теплота пароутворення;  $\tau$  – тривалість сушіння.

Швидкість сушіння в період прогрівання та в першому періоді  $-du/d\tau = \beta F(P_s - P_{\text{mn}})$ , де  $F$  – площа поверхні сушіння;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;  $P_s$  – тиск насиченої пари;  $P_{\text{mn}}$  – парціальний тиск пари в повітрі,  $P_{\text{mn}} = \phi P_s$ , де  $\phi$  – відносна вологість повітря. У другому періоді  $-du/d\tau = k(u - u_p)$ , де  $k$  – коефіцієнт сушіння;  $u_p$  – рівноважний вологовміст;  $u = u_0 = u_1$  [1].

Модель, що описує кінетику сушіння санітарно-гігієнічного паперу, складатиметься з рівнянь:

$$-du/d\tau = -\beta F(P_s - P_{\text{mn}}) + k(u - u_p) \quad \text{і} \quad \frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{q_r}{(c_n - c_b u)m} + \frac{r}{(c_n - c_b u)} \frac{du}{d\tau}$$



1 – експериментальна; 2 – теоретична

**Рис. 1 – Криві сушіння санітарно-гігієнічного паперу за густини теплового потоку:  
а – 3,5 кВт/м<sup>2</sup>; б – 4,0; в – 5,0 кВт/м<sup>2</sup>**

зменшується з 3,4 до 0,5 кг/кг. Експериментальна крива різко переходить з першого періоду в другий період сушіння, що характеризується повільним зменшенням швидкості до нуля за 30 с. Таке збільшення тривалості сушіння зв'язаної вологи в другому періоді можна пояснити зсіданням поверхневого шару волокон і, відповідно, збільшенням дифузійного опору.

**Висновки.** Розроблено математичну модель сушіння санітарно-гігієнічного паперу та одержано її розв'язок. Наведено кінетичні закономірності сушіння. Експериментально підтверджено адекватність за-

та межових умов третього роду для його верхньої й нижньої поверхонь:

$$-\frac{\lambda}{\delta}(t_{z1} - t_{z0}) + \alpha(t_{z0} - t_{\text{пов}}) = 0,$$

$$-\frac{\lambda}{\delta}(t_{z(n-1)} - t_{zn}) + \alpha(t_{zn} - t_{\text{пов}}) = 0,$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $z$  – товщина елементарного шару;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності вологого паперу;  $\delta$  – товщина паперу;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від паперу;  $q_r$  – густина теплового потоку;  $t_{\text{пов}}$  – температура повітря.

Тепловий потік проникає крізь увесь шар паперу:  $q_r|_z = q_r|_0 - \int_0^z a \alpha z$  [1, 2], де  $a = a_f(1-w) + w\delta a_w$  – коефіцієнт поглинання променів вологою та воло-

конном;  $a_f = \frac{1}{L} \ln \left( 1 - \frac{\alpha_f}{1-R_f} \right)$  і  $a_w$  – коефіцієнти поглинання променів волокном і вологою;  $w$  – вологість паперу в частках;  $R_f$  – коефіцієнт віддзеркалення променів волокном.

Одержану математичну модель розв'язано методом «кінцевих різниць» та порівняно з експериментальними даними (рис. 1-3). При цьому дослідні зразки діаметром 80 мм виготовляли з санітарно-гігієнічного паперу. Їх зволожували до заданого вологовмісту, витримували в ексикаторі, вміщували на електричні ваги й висушували інфрачервоним промінням електричного випромінювача.

Установлено, що під дією променевого теплового потоку 3500 Вт/м<sup>2</sup> нагрівання вологого паперу триває 1,0...1,5 с. При цьому вологовміст зменшується з 1,55 до 1,50 кг/кг. Період сталої швидкості сушіння триває 19 с від 1,50 до 0,35 кг/кг. Під час другого періоду, що триває 20 с, швидкість сушіння зменшується майже до нуля, а вологовміст – від 0,30 до 0 кг/кг.

Зі збільшенням густини теплового потоку до 4000 Вт/м<sup>2</sup> швидкість сушіння в першому періоді суттєво збільшується. За 20 с вологовміст зменшується з 2,7 до 0,5 кг/кг. У другому періоді вологовміст зменшується від 0,5 до 0,07 кг/кг за 15 с. Це вказує на те, що зі збільшенням теплового потоку також збільшується і швидкість випаровування зв'язаної вологи.

Із збільшенням густини теплового потоку до 5000 Вт/м<sup>2</sup> у першому періоді за 10 с вологовміст

пропонованої моделі й можливість промислової реалізації процесу. Подальші дослідження будуть спрямовані на створення методики розрахунку промислової конструкції сушарки.

#### Список використаної літератури

1. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470 с.
2. Seyed-Yagoobi J. Heating/drying of uncoated paper with gas-fired infrared emitters – fundamental understanding / J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa // Proc. of the 14th Int. Drying Symp. ; August 2004. – Vol. B. – P. 1217–1224.

Надійшла до редакції 22.03.2015

---

*Marchevskiy V. M., Novokhat O. A., Voronin L. G., Tatarchuk O. O.*

#### DRYING OF SANITARY PAPER USING INFRARED RADIATION

*The results of research of process of drying of sanitary-hygienic paper are resulted with the use of infrared. The mathematical model of process which describes dependence of change of dryness and temperature in time is offered.*

*At drying of sanitary-hygienic paper use big and energy expense equipment which burns the considerable volumes of natural gas on heating of air for the convection constituent of process. One of lacks of such equipment there is low intensity of heat exchange and considerable effervescences with smoke gases by comparison to more effective radiation method of drying, at which heating of paper takes place in all his volume. Therefore research of kinetic conformities to law of process of drying of sanitary-hygienic paper with the use of infrared and determination of basic technological parameters, necessary for development of industrial equipment is actual. Theoretical bases of process of the radiation, infrared, infrared drying are stopped up A. Lykov [1]. For description of mechanism of the radiation, infrared drying of A. Lykov differential equalization of thermal transfer is offered, that takes into account an infrared as internal source of heat ( $Q_v$ ) in the skims of material.*

*In the article mathematical description of processes of thermal and mass transfer is offered in the elementary layer of paper. On the base of equalizations of thermal transfer and kinetics of drying the mathematical model of drying of sanitary-hygienic paper is developed. Numerical equalizations of mathematical model are executed, that presentation graphically. Verification model is adequate to conducted experiments.*

*The mathematical model of process of drying of sanitary-hygienic paper is developed and its decision is got. Was determined the kinetic of drying process.*

**Keywords:** *drying, infrared, sanitary-hygienic paper, dryness, kinetics.*

#### References

1. Lykov, A.V. (1968), *Teoriya sushki* [Theory of Drying], Energiya, Moskov, Russia.
  2. Seyed-Yagoobi, J. and Noboa, H. (2004), “Heating/drying of uncoated paper with gas-fired infrared emitters – fundamental under standing”, Proc. of the 14th Int. Drying Symp., vol. B, pp. 1217–1224.
- 

УДК 676.017.3

**МЕЛЬНИК О. П., ас.; МАРЧЕВСЬКИЙ В. М., к.т.н., проф.;**  
**БИКОВЕЦЬ Д. П., асп.; ВАСИЛЕНКО М. М., магістрант**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

#### ГАРЯЧЕ ПРЕСУВАННЯ ФЛЮТИНГУ

*Експериментально досліджено кінетику гарячого пресування паперу для гофрування (флютингу). Одержано залежності сухості флютингу від тривалості його перебування в зоні пресування, температури вала, лінійного тиску в захваті преса та маси квадратного метра флютингу.*

**Ключові слова:** *паперове полотно, гаряче пресування, кінетичні закономірності.*

© Мельник О. П., Марчевський В. М., Биковець Д. П., Василенко М. М., 2015.

**Постановка проблеми.** Суттєво знизити затрати теплоти на сушильній частині папероробної машини можна гарячим пресуванням паперу з досягненням його сухості 60...70 % [1]. Проте цей процес описано недостатньо, що не дозволяє створити алгоритм розрахунку промислових гарячих пресів.

---