

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, металоємне 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:

$$c_{c_0} \frac{dt}{d\phi} = \text{div}(\lambda \nabla t) + \text{erc}_0 \frac{du}{d\phi} + Q_v.$$

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  $(\lambda \nabla t)_n + b(t_c - t_n) + q_r - rj_2 = 0$ , 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:

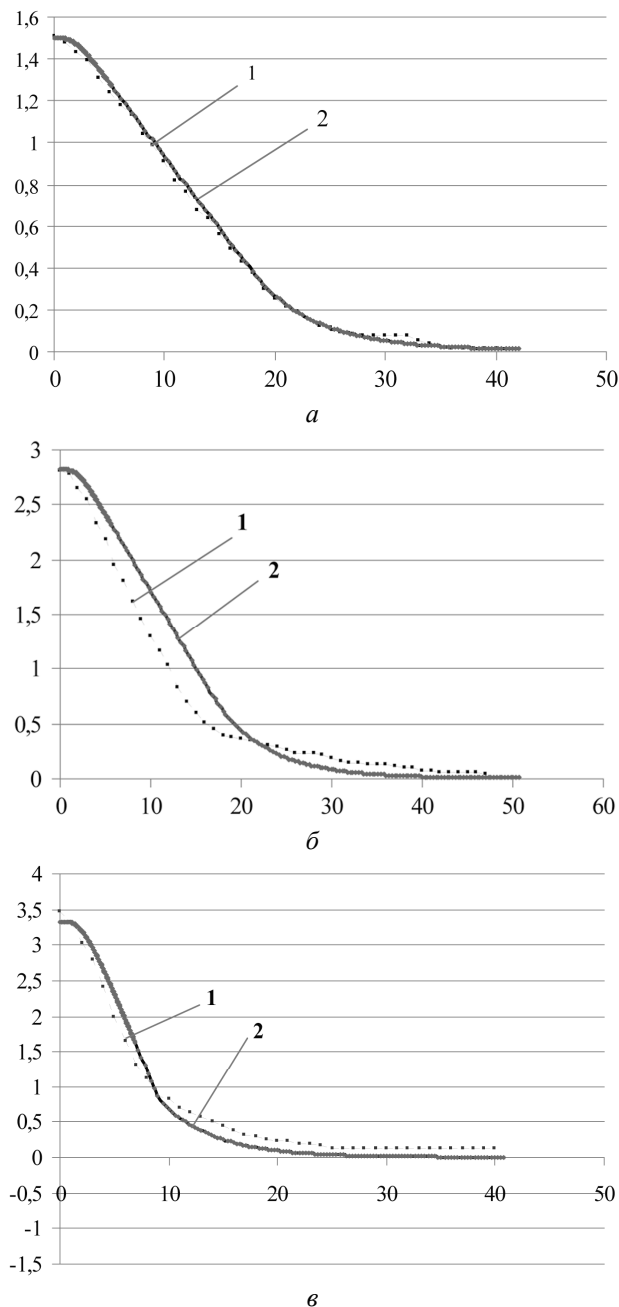
$$dQ = m[(c_{\text{асп}} + c_b u) dt] = q_r d\phi + rm \frac{du}{d\phi} d\phi \quad \text{звідки} \quad \frac{dt}{d\phi} = \frac{q_r + rm \frac{du}{d\phi}}{m(c_{\text{асп}} + c_b u)},$$

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  $-du/d\phi = \beta F(P_s - P_{\text{мн}})$ , де  $F$  – площа поверхні сушіння;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;  $P_s$  – тиск насиченої пари;  $P_{\text{мн}}$  – парціальний тиск пари в повітрі,  $P_{\text{мн}} = \alpha P_s$ , де  $\alpha$  – відносна вологість повітря. У другому періоді  $-du/d\phi = k(u - u_p)$ , 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:

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



1 – експериментальна; 2 – теоретична

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

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

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

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

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

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:  $q_r|_z = q_r|_0 - \int_0^z a dz$  [1, 2], де  $a = a_f(1-w) + wSa_w$  – коефіцієнт поглинання променів вологою та

волокном;  $a_f = \frac{1}{L} \ln \left( 1 - \frac{\delta_f}{1 - R_f} \right)$  і  $a_w$  – коефіцієнти

поглинання променів волокном і вологою; *w* – вологість паперу в частках;  $R_f$  – коефіцієнт відзеркалення 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 води.

