

12. Михайлик В.А. Применение термических методов исследования в решении научных и производственных задач энергоэффективности. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій / Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2007. – Вип. 31, – Т.1. – С. 170-177.
13. Михайлик В.А., Давыдова Е.О., Манк В.В. Исследование гидратации сахарозы методом низкотемпературной сканирующей калориметрии // Термодинамика органических соединений. – Горький, 1989. – С. 76–80.
14. Давыдова Е.О. Воздействие низких температур на состояние свекловичной ткани и её основных компонентов при хранении сахарной свеклы: Дис. ...канд. техн. наук: 05.18.05. – Киев, 1992. – 172 с.
15. Влияние различных способов гидротермической обработки овощей на микроструктуру их тканей / В.С. Баранов, Л.М. Алешина, Т.В. Жубрева, М.И. Гергова // Экспресс-выпуск ЦНИИТЭИпищепром. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1983. – серия 4, вып. 6. – С. 6-7.

УДК 664.723.047.59

НОВІ КОНСТРУКЦІЇ СУШАРОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ЗЕРНОПРОДУКТІВ ПРИ ЗМЕНШЕННІ ПИТОМИХ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ

**Бурдо О.Г., д.т.н., проф., Безбах І.В., к.т.н., Зиков О.В., к.т.н., Латанський Є.В. асп.
Одеська національна академія харчових технологій**

Рассмотрены аппараты на базе термосифонов для сушки. Приведены результаты экспериментальных исследований.

devices on the basis of thermosiphons for drying are considered. Results of experimental researches are presented.

Ключевые слова: термосифоны, пшеница

Для сучасного зерносушіння характерні дві проблеми: високі енерговитрати й забруднення зерна продуктами згорання. Витрати енергії на зерносушіння вищі, ніж енерговитрати при виробництві зерна. Тому доцільно шукати резерви зниження енергетичних витрат у зерносушінні. В Україні в якості сушильного агента використовують суміш топкових газів і повітря. Безпосередній контакт продуктів згорання із зерном погіршує його якість у зв'язку з можливим проникненням у продукт канцерогенних компонентів. Напрямок вдосконалення сушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на видалення вологи, забезпечення екологічної безпеки продукту, що висушується, розробка високоефективної зерносушильної техніки. Можливості зниження витрат палива на сушіння не вичерпані й тут є невикористані резерви. Досвід застосування у світовій практиці теплових труб і термосифонів (ТС) дозволяє розраховувати на можливість створення на їхній базі енергоефективних і екологічно безпечних апаратів для термообробки зерна. Тому, розвиток наукової бази про механізми тепло - масообміну в апаратах із ТС і створення на їхній основі сушарок, методик їх розрахунку є актуальним.

Аналіз світової практики сушіння зерна показує, що 10 % всіх енерговитрат припадає на привід вентиляторів, а інші 90 % – на сушіння. Теплова енергія розподіляється в середньому так: на випаровування вологи витрачається 40 %, на нагрівання зерна – 10 %, на нагрівання повітря й пари води до температури сушильного агента – 20 %, і 30 % теплоти втрачається в навколишнє середовище [1]. Значним недоліком сучасних конвективних зерносушарок є викид відпрацьованого теплоносія в атмосферу, що має тепловміст усього лише на 10 – 15 % менше, ніж гаряче повітря, що подається в сушильну камеру. Ефективним шляхом комплексного рішення проблем енергетики й екології при сушінні зерна є використання в технологіях теплових труб. В останні роки в індустріально розвинених країнах намітився значний інтерес до нових високоефективних тепловодів – теплових труб і термосифонів, здатних передати теплоту з питомою потужністю 3 – 6 кВт/м² теплопередаючої поверхні. Оснащення сушарок рекуператором з використанням термосифонів дозволяє знизити витрати первинного теплоносія на 15 – 25 %.

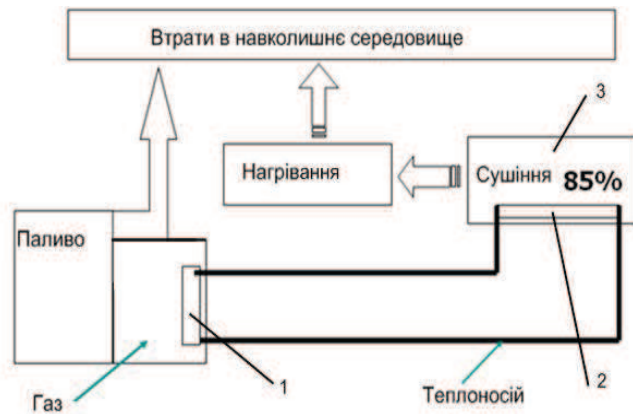


Рис. 1 – Схема блокової зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія

зерну. Конденсат повертається у випарник. Результати експериментальних досліджень показують, що енерговитрати блокової зерносушарки нижчі існуючих конвективних сушарок і складають 2,8...3 МДж/кг.

Метою подальших досліджень є розробка енергоефективних апаратів на базі термосифонів для сушіння зернопродуктів розробка теоретичних основ та методик їх розрахунку.

В основу методик розрахунку таких апаратів положено двокомпонентну модель теплопереносу між термосифонами та шаром сипучого матеріалу з урахуванням випаровивання вологи з зерна.

- на конденсаційних ділянках ТС:

для зерна

$$G_3 c_{p3} \frac{dt_3}{dz} + (\alpha_{B3}(t_B - t_3) + q_m) F_K \varepsilon_V = \frac{N_T}{V_{я}} F_K F_{II} (t_n - t_3) \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3} + \frac{1}{\alpha_K}} \quad (1)$$

для повітря

$$G_6 c_{p6} \frac{dt_6}{dz} - (\alpha_{B3}(t_B - t_3) + q_m) F_K \varepsilon_V = \frac{N_T}{V_{я}} F_K F_{II} (t_n - t_3) \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{KB}} + \frac{1}{\alpha_K}} \quad (2)$$

- на випарній ділянці ТС для газу:

$$G_{\Gamma} c_{p\Gamma} \frac{dt_{\Gamma}}{dz} = \frac{N_T}{V_{я\Gamma}} F_{я\Gamma} F_K (t_{II} - t_n) \frac{1}{R_{\Gamma II}} \quad (3)$$

де - $R_{\Gamma II} = \alpha_2^{-1} + R_1 + R_2 + \alpha_u^{-1}$ загальний термічний опір ТС,

G_B – витрати повітря G_3 – витрати зерна, G_{Γ} – витрати газу,

F_K – поверхня конденсатора, F_{II} – поверхня випарника, $F_{я\Gamma}$ – поверхня ділянки,

N_T – кількість ТС,

$V_{я}$ – об'єм ділянки з зерновим шаром, $V_{я\Gamma}$ – об'єм ділянки з газовим потоком.

q_m – потік водяної пари, що видаляється з зерна.

t_B – температура повітря, t_3 – температура на поверхні зерна.

Для урахування міжкомпонентного тепломасообміну можливо використовувати модель взаємодії зернового шару та вологого повітря, що базується на моделі тонкого шару, яка складається з трьох зон. Передбачається, що кожна зона характеризується однаковою температурою і вмістом вологи. Випаровування вологи відбувається з 3-ої (зовнішньої) зони.

Тепломасообмен зернівки з навколишнім повітрям, запишемо:

$$q = \alpha (T_3 - T_6) \quad (4)$$

$$q_m = \beta (p_{n3} - p_n) \quad p_{n3} = A_w p_n \quad (5)$$

тепло і масообмін між зонами описується рівняннями теплопровідності і дифузії.

$$G_{12} = D_{12} (W_1 - W_2) \quad G_{23} = D_{23} (W_2 - W_3) \quad (6)$$

$$(Q_{12} = F_1 \frac{\lambda_{\phi}}{\delta_{12}} (T_1 - T_2) \quad Q_{23} = F_2 \frac{\lambda_{\phi}}{\delta_{23}} (T_2 - T_3) \quad (7)$$

На підставі матеріального балансу отримаємо:

$$\frac{\partial(\rho_3 \cdot V_3 \cdot n_1 \cdot W_1)}{\partial \tau} = -G_{12} \quad \frac{\partial(\rho_3 \cdot V_3 \cdot n_2 \cdot W_2)}{\partial \tau} = G_{12} - G_{23} \quad \frac{\partial(\rho_3 \cdot V_3 \cdot n_3 \cdot W_3)}{\partial \tau} = G_{23} - F_3 q_m \quad (8)$$

Вважаючи, що випаровування походить тільки з третьої зони і нехтуючи зміною розмірів зернівки при сушці ($\rho_3 \cdot V_3 \cdot n_i = \text{const.}$) отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_1}{\partial \tau} &= \frac{B_1}{\rho_3 n_1} (W_2 - W_1) \\ \frac{\partial W_2}{\partial \tau} &= \frac{B_1}{\rho_3 n_2} (W_1 - W_2) + \frac{B_2}{\rho_3 n_2} (W_3 - W_2) \\ \frac{\partial W_3}{\partial \tau} &= \frac{B_2}{\rho_3 n_3} (W_2 - W_3) + \frac{\beta S_{y0}}{\rho_3 n_3} (p_n - p_{n3}) \end{aligned} \quad (9)$$

де $B_1 = k_{12}/v_3$, $B_2 = k_{23}/v_3$

припускаючи рівномірний розподіл вологи $W = n_1 \cdot X_1 + n_2 \cdot X_2 + n_3 \cdot X_3$ отримаємо:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\beta S_{y0}}{\rho_3} (p_n - p_{n3}) \quad (10)$$

У випадку $q_m > 0$ (сушіння) отримаємо зміну внутрішньої енергії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_3 \cdot V_3 (c_{p3} + W \cdot c_{p6}) \cdot T_3)}{\partial \tau} &= -F \cdot q - F \cdot q_m (I + c_{p3} T_3) \\ \frac{\partial T_3}{\partial \tau} &= \frac{-\alpha S_{y0} (T_3 - T_6) - \beta S_{y0} (p_n - p_{n3}) r}{\rho_3 (c_{p3} + X c_{p6})} \end{aligned} \quad (11)$$

Глибокий шар представляємо послідовністю елементарних шарів симетричних щодо напрямку руху сушильного агента. Тоді баланс вологи в повітрі:

$$\frac{\partial(p_6 d)}{\partial t} = -\text{div}(w_6 p_6 d) + j_m S_{y0} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (12)$$

вважаючи тиск повітря в межах шару постійним

$$\frac{\partial d}{\partial t} = -w_6 \frac{\partial d}{\partial z} + j_m S_{y0} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (13)$$

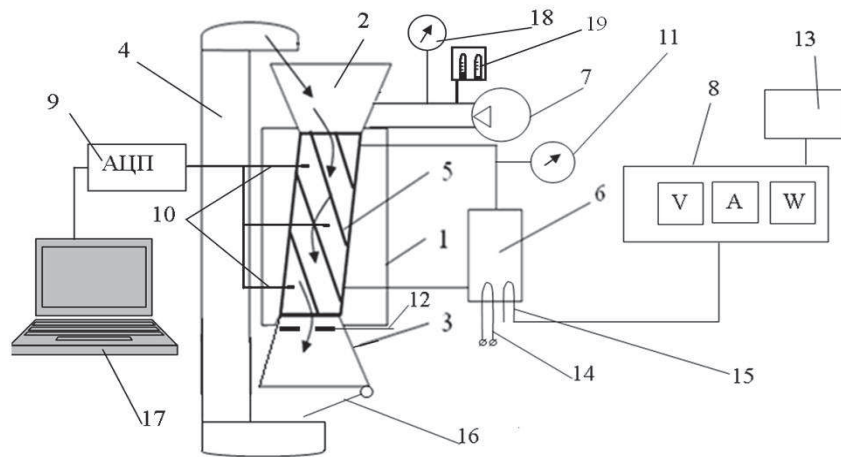
Тепловий баланс:

$$\frac{\partial(p_6 (c_{603} + d c_n) T_6)}{\partial t} = -\text{div}(w_6 p_6 (c_{603} + d c_n) T_6) + S_{y0} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} (j_m r + j_c) \quad (14)$$

вважаючи $c_{p6}, c_{p603}, T_6 = \text{const}$

$$\frac{\partial T_6}{\partial t} = -w_6 \frac{\partial T_6}{\partial z} + S_{y0} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{j_m c_{pn} (T_3 - T_6) + j_c}{p_6 (c_{603} + d c_n)} \quad (15)$$

приймаючи крок моделювання ∂t достатньо малим можна вважати параметри вологого повітря постійними і по рівняннях 13,15 отримати розподіл їх в просторі між тепловими трубами.



1 – шахта, 2 – завантажувальний бункер, 3 – прийомний бункер, 4 – норія, 5 – конденсатор, 6 – парогенератор, 7 – вентилятор, 8 – вимірний комплекс К-50, 9 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП), 10 – термопари, 11 – манометр, 12 – шибер, 13 – ЛАТР, 14 – нерегульований ТЕН, 15 – регульований ТЕН, 16 – відкидний лоток, 17 – ПК, 18 – анемометр, 19 – психрометр

Рис. 2 – Схема експериментального стенда

Значення невідомих кінетичних коефіцієнтів, термограми, залежність питомих енерговитрат на сушіння від температури поверхні конденсатора отримано на експериментальному стенді (рис. 2). В результаті аналізу властивостей повітря, що викидається з блокової зерносушарки отримано залежність (рис. 3) потенціалу енергозбереження (ΔI) від температури поверхні модуля (T_n) та швидкості повітря в між зерновому просторі ($\omega_{мп}$), де ΔI – різниця між ентальпією повітря на виході із сушарки й ентальпією на лінії насичення

Для вимірювання температури зернового потоку усередині шахти використовували три термопари. Дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП і вводилися в ПК. Температуру повітря, що йде із сушарки, визначали за допомогою стандартного психрометра і двох термопар. Вологість зерна вимірювали за допомогою цифрового вологоміра РМ-600.

Параметри повітря, що йде із блокової сушарки, близькі до точки фазового переходу (40 °С і відносною вологістю $\varphi=80-90\%$).

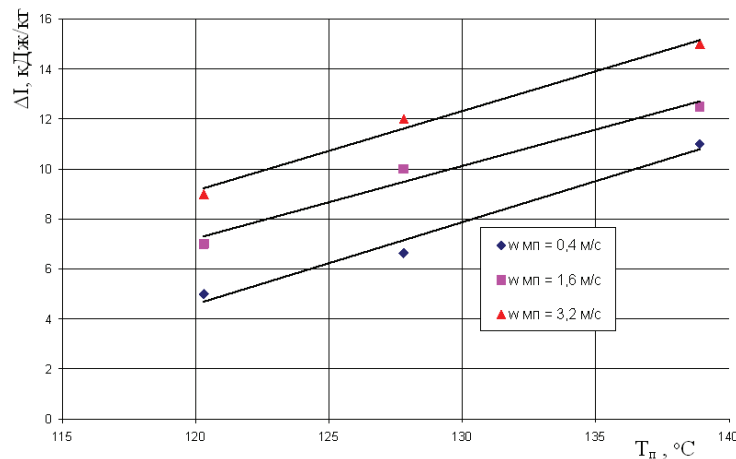


Рис. 3 – Потенціал енергозбереження блокової зерносушарки

Аналіз параметрів повітря, що відпрацювало, показує, що з'являється реальна можливість використання тепла конденсації для попереднього нагрівання зерна. Таким чином отримано можливість створення рекуперативної сушильної установки, що забезпечує екологічно чисте сушіння зернопродуктів при підвищеній енергетичній ефективності.

Література

1. Бурдо О. Г., Безбах И. В., Зыков А. В. Моделирование процесса сушки в блочной зерносушилке, Сборник научных трудов конференции «СЭТТ – 2011», том 1, Москва – 2011.
2. Тепло- массообменная аппаратура на базе двухфазных модулей [Электронный ресурс] / О. Г. Бурдо, Омар Саид Ахмед, И. В. Безбах, В. И. Донкоглов // Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв: Матеріали XII Міжнар. наук. конф., Одеса 8-12 верес. 2008 р. / ОНАХТ. – О., 2008. – С. 301-305: табл.; рис. – Бібліогр.: 2 назв. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Развитие конструкций тепло- массообменных аппаратов на базе автономных двухфазных модулей [Текст] / А. В. Зыков, И. В. Безбах, Омар Саид Ахмед, В. И. Донкоглов // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2008. - Вип. 32. - С. 208-217.