

УДК 631.372: 629.02

Математична модель динаміки процесів тепловологісної обробки в проточному апараті

Б.І. Котов, А.А. Руденський, О.Д. Курганський

*Національний університет біоресурсів і природокористування України.
(м. Київ, Україна)*

Можливість термообробки дисперсних матеріалів, що рухаються в проточному газовому потоці є відомою. Теплообмін в рухомому потоці газу характеризується високою інтенсивністю передачі теплоти від газу-теплоносія до матеріалу і навпаки від нагрітого матеріалу до охолоджуючого повітря. Однак відсутня надійна математична модель, що відтворює динаміку теплообміну в об'єктах з розподіленими параметрами, не дозволяє визначити раціональні параметри і режими таких установок, стримує розвиток системи управління. Для вирішення цього питання у статті розроблена математична модель нагріву зерна в умовах пневмотранспортера з урахуванням розподіленості параметрів. Основою для моделі обрано рівняння теплового балансу, якими можна описати процеси конвективного теплообміну для виділеного елемента труби. Отримані рівняння які визначають розподіл температур теплоносія і зерна за довжиною пневмотракта для будь якого моменту часу. При цьому новизною є можливість одним рівнянням визначити перехідний процес для фактичного розподіленого об'єкта. Результатом статті є встановлені математичні залежності зміни температури зерна і теплоносія при проточному русі в пневмоканалі за висотою та в часі. Отриману динамічну модель теплообміну зерна з теплоносієм можна використовувати для розробки системи керування процесом нагріву, що значно підвищить його ефективність.

Ключові слова: нагрів, зерно, динаміка, пневмотранспорт, теплообмін

Постановка питання. При кондиціюванні технологічного мікроклімату у виробничих приміщеннях (культивацийні споруди, камери зберігання плодовоовочевої продукції, приміщення для утримання тварин і птиці та інш.) широко застосовуються охолоджувачі та зволожувачі повітря контактного типу, які працюють за принципом безпосереднього контакту потоків води і повітря коли теплота відбирається від потоків повітря і води та витрачається на випаровування вологи (перетворення води в пару, якою насичується повітря, зменшує його температуру і збільшує вологість). Дослідження таких систем і апаратів виконуються, як правило при стаціонарних режимах, що дозволяє визначити їх оптимальні параметри. Для систем створення мікроклімату виробничих споруд (закритий ґрунт) режими роботи завжди нестаціонарні завдяки наявності змінних в часі зовнішніх збурень. В зв'язку з цим виникає необхідність дослідження (перехідних) динамічних режимів роботи систем охолодження і зволоження повітря.

Аналіз досліджень. Питання зволоження повітря водою вивчалися багатьма дослідниками [1, 2, 3, 4], але при цьому розглядалися питання статичної взаємодії повітря з водою [1, 2], або ж

динаміка процесу випаровування рідини [3]. Процеси взаємодії потоків повітря і розпиленої води при нестаціонарних режимах висвітлені в [4].

Виклад основного матеріалу. Математичний опис динаміки тепло-вологісної обробки повітря в установці з дрібнодисперсним розпилюванням води складемо на основі рівнянь теплового і матеріального балансу, виходячи з таких фізичних уявлень процесу:

Адіабатичний процес зволоження повітря відбувається за рахунок сумісного тепло- і масо-переносу при безпосередньому контакті повітря з поверхнею водяних крапель. В процесі контакту з повітрям вода нагрівається і випаровується; повітря зволожується і охолоджується. Теплота, що відбирається від повітря витрачається на нагрівання води і випаровування вологи. Випаровувана волога поглинається повітрям і збільшує його вологовміст. В умовах повного випаровування води в об'ємі камери температура води швидко набуває температуру зволоженого повітря на виході камери. При виведенні рівнянь прийняті такі припущення:

- в камері зволожувача повітря має місце хороше перемішування повітряно-крапельної суміші і параметри повітря дорівнюють зна-

ченням на виході, тобто установка розглядається як апарат ідеального змішування проточного типу;

- фізичні властивості робочих середовищ віднесені до середніх значень параметрів на вході і виході;
- коефіцієнти тепло- і масообміну в процесі обробки повітря не змінюються і мають значення, середні за процес;
- акумуляція теплоти відбувається в повітряно-водяній суміші.

Математичну модель процесу тепловологісної обробки повітря знайдемо у вигляді рівнянь динаміки змінення температури і вологовмісту повітря на виході апарата, для чого складемо рівняння теплового і матеріального балансу.

Баланс теплоти і маси для стаціонарного режиму запишемо у вигляді рівнянь:

- теплового балансу повітряно-водяної суміші

$$G_v C_p t_1 + G_w C_w \theta_1 + r G_v d_1 - G_v C_p t - r G_v d - G_w C_w t = 0; \quad (1)$$

- балансу вологи в повітрі

$$G_v d_1 - G_v d - \beta F (P''(t) - P_v(d)) = 0, \quad (2)$$

де G_v, G_w — витрати повітря і розпилюваної води, кг/с; θ_1, t_1, t — температура води і повітря на вході і виході, °С; d_1, d — вологовмісту повітря на вході і виході, кг/кг.с.п; C_p, C_w, r — питома теплоємність повітря, води і пароутворення, відповідно, Дж/(кг °С), Дж/кг; β — коефіцієнт вологообміну, кг/(м²·с·Па); F — поверхня розділу фаз повітря і води при температурі поверхні води, м²; $P''(t) = a\bar{t} + c$ — тиск насиченої пари при температурі поверхні води, Па; a, b, c — коефіцієнти лінійної апроксимації; $P_v(d) = b \cdot d$ — парціальний тиск пари в повітрі, Па.

При небалансі між вхідними і вихідними тепловими та матеріальними потоками відбувається накопичення теплоти і маси в акумулюючих ємностях за проміжок часу dt . За таких умов рівняння перехідних процесів для тепловологісної обробки повітря матимуть вигляд:

$$(M_v C_p + M_w C_w) \frac{dt}{dt} = G_v C_p (t_1 - t) + G_w C_w \theta_1 + G_v r (d_1 - d) - (G_v C_p + G_w C_w) t \quad (3)$$

$$(M_v + M_w) \frac{dd}{dt} = G_v (d_1 - d) + \beta F (a\bar{t} + c - b\bar{d}) \quad (4)$$

де M_v, M_w — маса повітря і води в об'ємі камери, кг; $\bar{t} = 0.5(\theta_1 + t)$ — середня температура поверхні розділу; $\bar{d} = 0.5(d_1 + d_2)$ — середній вологовміст повітря.

Змінні параметри об'єкту моделювання запишемо (з урахування їх приросту) у вигляді:

$$t_1 = t_{10} + \Delta t; \quad t = t_0 + \Delta t; \\ \theta_1 = \theta_{10} + \Delta \theta_1; \quad d_1 = d_{10} + \Delta d; \\ d = d_0 + \Delta d; \quad G_v = G_{v0} + \Delta G_v; \quad G_w = G_{w0} + \Delta G_w$$

Підставляючи значення змінних параметрів в рівняння (3) і (4), після множення, нехтування складовими другого ступеню малості і віднімання рівнянь статички (1), (2), будемо мати рівняння динаміки змінення параметрів повітря у приростах:

$$(M_v C_p + M_w C_w) \frac{d\Delta t}{dt} = G_v C_p \Delta t_1 + G_w C_w \Delta \theta_1 + G_v r \Delta d_1 + (C_p t_1 + r d_1 - C_p t - r d) \Delta G_v + (C_w \theta_1 - C_w t) \Delta G_w - r G_v \Delta d - (C_p G_v + G_w C_w) \Delta t \quad (5)$$

$$(M_v + M_w) \frac{d\Delta d}{dt} = (G_v - 0.5\beta F b) \Delta d_1 + (d_1 - d_2) \Delta G_v - 0.5\beta F a \Delta \theta_1 + 0.5\beta F a \Delta t - (G_v + 0.5\beta F b) \Delta d \quad (6)$$

Рівняння (5) і (6) можна застосовувати для опису динамічних режимів роботи плівкових зволожувачів або охолоджувачів повітря з плоско-паралельною насадкою (наприклад зрошувальна тканинна насадка). В цьому випадку величина F визначає повну поверхню масообміну (поверхня розділу води і повітря) за умов повного випарування води з поверхні при проходженні повітря і є величиною незмінною ($F = \text{const}$).

При використанні для зволоження повітря в камері зволожувача розпиленої води поверхня масообміну буде залежати від таких факторів:

Діаметру краплі d_k , витрати води G_w , часу перебування (часу повного випарування краплі τ_k). Цю залежність можна визначити за формулою:

$$F = \frac{G G_w}{d_k \rho_k} \tau_k, \quad \text{де} \quad \tau_k = \frac{S_k}{V_k}, \quad (7)$$

де S_k, V_k — шлях і швидкість краплі.

Оскільки параметри d_k, S_k, V_k , які характеризують технічні показники розпилювача (диска, форсунка, УЗР) і для даного типу є величинами постійними, то змінним параметром буде величина витрат води:

$$\Delta F = K \Delta G, \quad (8)$$

де

$$K = \frac{G S_k}{d_k \rho_w V_k}; \quad F_0 = \frac{G G_{w0} S_{k0}}{d_{k0} \rho_{w0} V_{k0}}$$

Підставляючи значення (8) в рівняння (4) і враховуючи, що

$$F = F_0 + \Delta F, \quad F = F_0 + K\Delta G,$$

$$F = KG_{w0} + K\Delta G,$$

G_{w0} — витрати в сталому режимі.

Після перетворень будемо мати:

$$(M_v + M_w) \frac{d\Delta d}{d\tau} = (G_v - 0.5\beta b F_0) \Delta d_1 +$$

$$+ 0.5\beta a F_0 \theta_1 + 0.5\beta a F_0 \Delta t + (d_1 - d) \Delta G_v + \quad (9)$$

$$+ 0.5[a\beta(\theta_1 - t) + 2\beta c - \beta b(d_1 + d)] K \Delta G_w -$$

$$-(G_v + 0.5\beta b F_0) \Delta d$$

Введемо такі позначення:

$$T_1 = \frac{M_v C_p + M_w C_w}{F_1};$$

$$F_1 = G_v C_p + G_w C_w;$$

$$K_1 = \frac{G_v C_p}{F_1}; \quad K_2 = \frac{G_w C_w}{F_1}; \quad K_3 = \frac{G_v r}{F_1};$$

$$K_4 = \frac{C_p t_1 + r d_1 - C_p t - r d}{F_1};$$

$$K_5 = \frac{C_w \theta_1 - C_w t}{F_1}; \quad K_6 = \frac{r \times G_v}{F_1}; \quad T_2 = \frac{M_v M_w}{F_2};$$

$$F_2 = G_v + 0.5\beta b F_0; \quad K_7 = \frac{G_v - 0.5\beta b F_0}{F_2};$$

$$K_8 = \frac{0.5a\beta F_0}{F_2}; \quad K_9 = \frac{0.5\beta a F_0}{F_2}; \quad K_{10} = \frac{d_1 - d}{F_2};$$

$$K_{11} = \frac{0.5 \times K[a\beta(\theta_1 - t) + 2\beta c - \beta b(d_1 + d)]}{F_2}$$

Перепишемо рівняння (5) і (9) з урахуванням прийнятих позначень:

$$T_1 \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t = K_1 \Delta t_1 + K_2 \Delta \theta_1 +$$

$$+ K_3 \Delta d_1 + K_4 \Delta G_v + K_5 \Delta G_w - K_6 \Delta d \quad (10)$$

$$T_2 \frac{d\Delta d}{d\tau} + \Delta d = K_7 \Delta d_1 + K_8 \Delta \theta_1 +$$

$$+ K_9 \Delta t + K_{10} \Delta G_v + K_{11} \Delta G_w \quad (11)$$

Представимо рівняння (10) і (11) в операторній формі:

$$(T_1 p + 1) \Delta t_2(p) = K_1 \Delta t_1(p) + K_2 \Delta \theta_1(p) +$$

$$+ K_3 \Delta G_v(p) + K_4 \Delta d_2(p) + K_5 \Delta F(p), \quad (12)$$

$$(T_2 p + 1) \Delta d_2(p) = K_6 \Delta d_1(p) + K_7 \Delta G_v(p) +$$

$$+ K_8 \Delta \theta_1(p) + K_9 \Delta t_2(p) + K_{10} \Delta F(p). \quad (13)$$

З рівнянь (12), (13) визначимо передавальні функції за керованими та керуючими параметрами.

$$W_1(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1},$$

$$W_2(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta \theta_1(p)} = \frac{K_2}{T_1 p + 1},$$

$$W_3(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta G_v(p)} = \frac{K_3}{T_1 p + 1},$$

$$W_4(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta d_2(p)} = \frac{K_4}{T_1 p + 1},$$

$$W_5(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta F(p)} = \frac{K_5}{T_1 p + 1},$$

$$W_6(p) = \frac{\Delta d(p)}{\Delta d_1(p)} = \frac{K_6}{T_2 p + 1},$$

$$W_7(p) = \frac{\Delta d(p)}{\Delta G_v(p)} = \frac{K_7}{T_2 p + 1},$$

$$W_8(p) = \frac{\Delta d(p)}{\Delta \theta_1(p)} = \frac{K_8}{T_2 p + 1},$$

$$W_9(p) = \frac{\Delta d(p)}{\Delta t(p)} = \frac{K_9}{T_2 p + 1},$$

$$W_{10}(p) = \frac{\Delta d_2(p)}{\Delta F(p)} = \frac{K_{10}}{T_2 p + 1}.$$

Таким чином, рівняння (12), (13) можна подати у вигляді структурної схеми лінійної математичної моделі (рис. 1).

$$\Delta \varphi = \frac{1}{K a t_0} \Delta d - \frac{1}{K a \varphi_0} \Delta t.$$

Рівняння (12-13) динаміки параметрів повітря зволожувача отримані в приростах параметрів і описують процеси в межах малих відхилень.

Для визначення впливу конструктивних і режимних параметрів на динамічні властивості зволожувача повітря можна скористатися розв'язком системи рівнянь (3-4).

Використовуючи наступні позначення:

$$T_3 = \frac{M_v C_p + M_w C_w}{G_v \times r};$$

$$a_1 = \frac{G_v C_p + G_w C_w}{G_v \times r};$$

$$b_1 = \frac{G_v C_p t_1 + G_v r d_1 + G_w C_w \theta_1}{G_v \times r}$$

$$T_4 = \frac{M_v + M_w}{0.5\beta F a};$$

$$a_2 = \frac{0.5\beta F b}{0.5\beta F a};$$

$$b_2 = \frac{G_v d_1 + 0.5\beta F a \theta_1 - 0.5\beta F d + \beta F c}{0.5\beta F a}$$

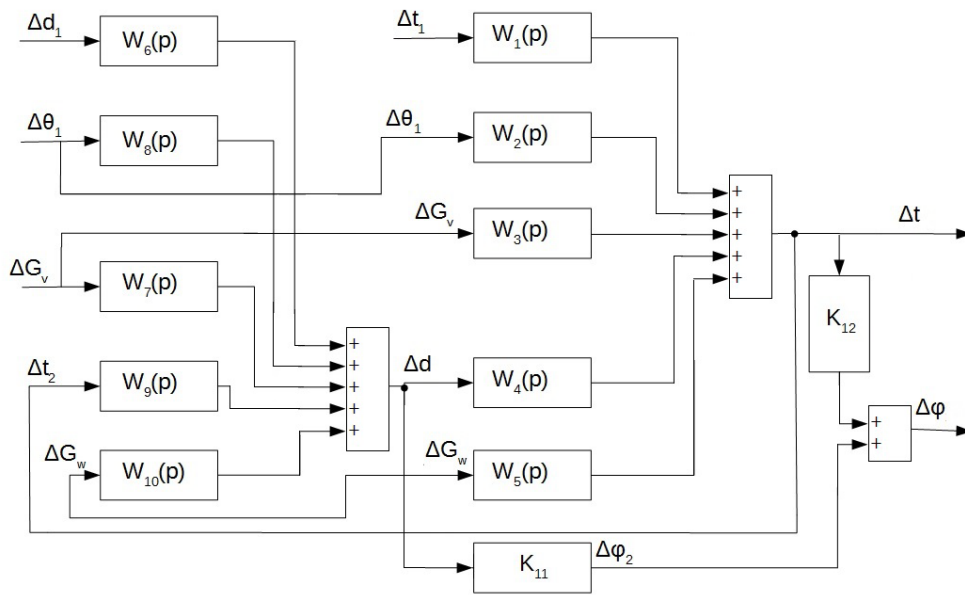


Рис. 1. Структурна схема лінійної математичної моделі проточного зволожувача

перепишемо рівняння (3-4) у вигляді:

$$\begin{cases} T_3 \frac{dt}{d\tau} + a_1 t - b_1 = -d, & (14) \\ T_4 \frac{dd}{d\tau} + a_2 d - b_2 = t; & (15) \end{cases}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (14) і (15) відносно $t(\tau)$ і $d(\tau)$, маємо

$$T_3 T_4 \frac{d^2 t}{d\tau^2} + (a_1 T_4 + a_2 T_3) \frac{dt}{d\tau} + (a_2 a_1 - 1)t = b_1 a_2 \quad (16)$$

$$T_3 T_4 \frac{d^2 d}{d\tau^2} + (a_1 T_4 + a_2 T_3) \frac{dd}{d\tau} + (a_2 a_1 - 1)d = b_2 a_1 \quad (17)$$

Розв'язок рівняння (16) за початкових умов : $t = 0, t = t_0$ буде мати вигляд:

$$t(\tau) = \frac{t_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C} \quad (18)$$

$$d(\tau) = \frac{d_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C} \quad (19)$$

де $A = T_3 T_4; B = a_1 T_4 + a_2 T_3; C = a_1 a_2 - 1;$

$$D_1 = b_1 a_2; D_2 = a_1 b_2;$$

$$r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

— корені характеристичних рівнянь.

На рис. 2 наведено графіки розгінних характеристик температури, вологовмісту та відносної вологості.

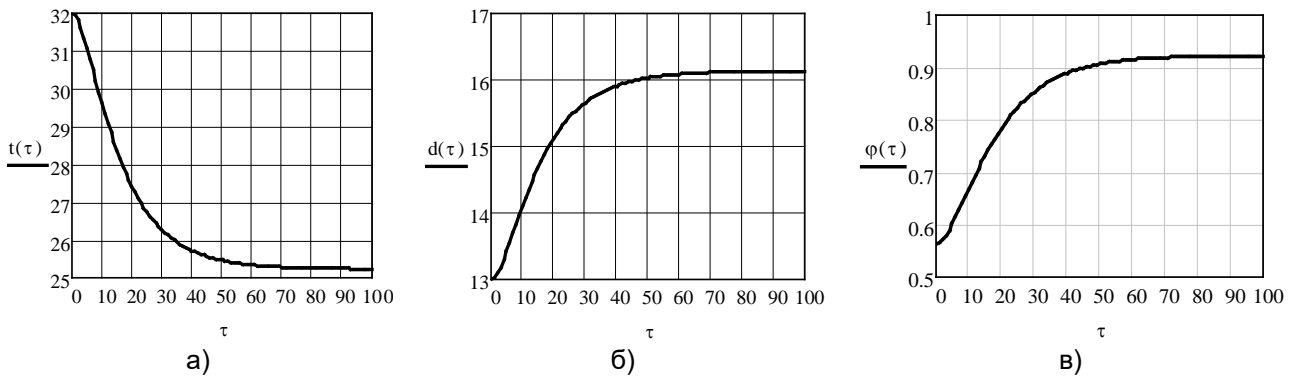


Рис. 2. Розгінні характеристики:
 а) температури; б) вологовмісту; в) відносної вологості

Висновки.

1. Створено динамічну математичну модель тепло- і масообміну в проточному апараті ідеального змішування.

2. Отримано аналітичні залежності зміни параметрів повітря в часі від режимних і конструктивних параметрів апарату.

Література

1. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газобразной среде. – М.: Издательство АН СССР, 1958. – 92 с.

2. Нестеренко А.В. Тепло- и массообмен при испарении жидкости со свободной поверхности // Журнал технической физики, 1954, т. XXIV, вып. 4, С. 729 - 741.

3. Куличенко В.А. К вопросу увлажнения воздуха распыленной водой / В. Куличенко, А. Воллик // Труды Николаевского кораблестроительного института. – 1978, вып. 137, С. 73 - 76.

4. Василів П.А. Економічна система вентиляції і зволоження повітря в овочесховищах / Василів П., О. Мужилко // Механізація та електрифікація сільського господарства. К.: 1991, вип. 76. – С. 26 - 29.

Аннотація

Моделирование динамики нагрева и охлаждения зернопродуктов в режиме пневмотранспортера

Б.И. Котов, А.А. Руденский, А.Д. Курганский

Для систем создания микроклимата производных споруд режимы работы всегда нестационарны из-за наличия переменных во времени внешних воздействий. В работе исследованы переходные динамические режимы работы систем охлаждения и увлажнения воздуха. Математический опис динамики тепло-вологісної обробки повітря в установці з дрібнодисперсним розпилюванням води складено на основі рівнянь теплового і матеріального балансу. Прийнято ряд уявлень та припущень. Розроблена математична модель динаміки адіабатичного зволоження повітря в проточному апараті. За розробленими моделями побудовані залежності розгінних характеристик температури, вологовмісту та відносної вологості.

Ключевые слова: температура, охлаждение, увлажнение, воздушный поток.

Abstract

Mathematical model of the thermal and humidity treatment processes in a flow apparatus

B.I.Kotov, A.A.Rudansky, A.Kurgansky

The ability to disperse heat treatment material moving in-flow gas stream is known. Heat in a moving stream of gas is characterized by high intensity of heat transfer from the coolant gas to the material and back from the heated material to the cooling air. However, no reliable mathematical model that reproduces the dynamics of heat transfer in the objects with distributed parameters, can not determine the rational parameters and modes such plants, hampering the development of management system. To address this issue in the article the mathematical model of heat conditions pnevmachnoho grain carrier based rozpodilenosti parameters. The basis for the model selected heat balance equations that describe the processes of convective heat transfer tubes for the selected item. The equations that determine the distribution of the coolant temperature and grain by pneumatic tract length for any point in time. This novelty is the possibility of one equation to determine the actual transition process for distributed object. The result of the paper is set mathematical dependence of grain temperature changes in the coolant-flow and movement in pneumatic channel height and time. The resulting dynamic model of heat transfer grain from the coolant can be used for the development of process control heating, which significantly increase its effectiveness.

Keywords: temperature, cooling, humidification, air flow.

Представлено: О.І.Завгородній / Presented by: O.I.Zavgorodniy

Рецензент О.В.Богомолов / Reviewer: O.V.Bogomolov

Подано до редакції / Received: 29.03.2015