

УДК 631.362

Моделювання динаміки нагріву та охолодження зернопродуктів в режимі пневмотранспортера

Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, В.В. Кифяк

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

Можливість термообробки дисперсних матеріалів, що рухаються в прямоточному 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 прямоточному 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 проблеми. Важливою і найбільш енергоємною операцією в технології післязбиральної обробки зерна і виробництва круп є сушіння. Найбільш розповсюджені отримали теплові способи і технологічні засоби сушіння зерно продуктів з конвективним способом передачі енергії. Значні можливості підвищення продуктивності обладнання і зниження енергоємності дає попереднє нагрівання матеріалу перед подачею в сушарку. Охолодження зерно продуктів після теплового сушіння є невід'ємною операцією загального процесу зниження вологості матеріалу перед подачею в подальшу переробку або зберігання. В сільськогосподарському виробництві широко застосовуються установки пневмотранспорта та пневматичного перевантаження зерно матеріалів. Тому виникає потреба розглянути теоретично можливості суміщення процесів термообробки (нагрівання, охолодження) із транспортуванням зерна в поточних лініях.

В літературі [1-3] розглянута можливість термообробки дисперсних матеріалів, що рухаються в прямоточному газовому потоці. Теплообмін в рухомому потоці газу характеризується високою інтенсивністю передачі теплоти від газу-теплоносія до матеріалу і навпаки від нагрітого матеріалу до охолоджуючого повітря. Однак

відсутність надійних математичних моделей, що відтворюють динаміку теплообміну в об'єктах з розподіленими параметрами, до яких відносяться теплові апарати типу «Газовзвесь» [4], не дозволяє визначити раціональні параметри і режими таких установок, стримує розвиток системи управління.

Мета роботи. Розробка математичних моделей динамічних режимів установок нагріву зерна в режимі пневмотранспорту.

Методи досліджень. Розглянемо процес нестационарного теплообміну між потоком теплоного носія і дисперсного матеріалу, що рухається в трубопроводі.

Потоки теплоносія і матеріалу можуть бути спрямовані в одну сторону-прямотечія або в протилежну — протитечія.

Диференціальні рівняння для визначення температури теплоносія $t(x, \tau)$ та матеріалу $\theta(x, \tau)$ можна отримати виходячи із аналізу теплового балансу, при таких припущеннях:

- пневмопровід теплоізований, тобто відсутні втрати у зовнішнє середовище і втрати теплоти від теплоносія до стінки відсутні;
- теплопередачу теплопровідністю не враховуємо;

- градієнт температури в зернинках незначні і його величиною нехтуємо, так як основна теплопередача зовнішня;
- приймаємо одномірний розподіл теплоти в напрямку руху;
- Температура потоків в кожному перетині приймається однаковою;
- ефекти випромінювання і кондуктивної теплопередачі враховуються в коефіцієнтах теплообміну;
- теплофізичні параметри теплоносія і матеріалу від температури не залежать, в часі та за координатою не змінюються;
- коефіцієнт теплообміну в часі та за довжиною пневмотранспортера не змінюється і дорівнює середньому значенню за весь процес термообробки.

Для задачі, що розглядається справедливий рівняння теплового балансу, якими можна описати процеси конвективного теплообміну [5] для виділеного елемента труби dx :

$$G_3 c_3 d\theta = \frac{\alpha f}{H} (t - \theta) dx, \quad (1)$$

$$-G_v c_p d\theta = \frac{\alpha f}{H} (t - \theta) dx, \quad (2)$$

$$G_3 = S \rho_3 c \frac{dx}{d\tau},$$

$$G_v = S \rho_v c \frac{dx}{d\tau}.$$

Розкриваючи повні диференціали:

$$dG = \frac{\partial G}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial G}{\partial x} dx, \text{ і враховуючи співвідношення}$$

$$\frac{dx}{d\tau} = v, \quad \frac{G}{v} = S \rho, \quad S \rho H = m, \text{ будемо мати:}$$

$$m_3 c_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + c_3 G_3 H \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha f (t - \theta); \quad (3)$$

$$m_v c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + c_p G_v H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f (\theta - t). \quad (4)$$

де: $m_3 c_3$ — теплоємність зерна і теплоносія. Дж/°С; G_3 , G_v — масові витрати зерна і повітря, кг/с; m_3 , m_v — маса зерна і повітря, яке знаходиться в об'ємі трубопроводу висотою H , кг; α — коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м²°С; f — поверхня матеріалу, що знаходиться в трубопроводі, м²; S — площа перетину потоків, м²; v — швидкість переміщення потоків, м/с; ρ — густина матеріальних потоків, кг/м³; τ — час, с; x — координата за висотою трубопроводу.

Знак мінус в рівнянні (3) для протитечії.

Використовуючи очевидні співвідношення:

$$F_3 = G m_3; \quad m_3 = G_3 \tau,$$

Визначимо величину поверхні матеріалу, що одночасно знаходиться в об'ємі трубопроводу:

$$F = \sigma G_3 \tau_{np}, \quad (5)$$

де: σ — питома поверхня зерно матеріалу, м²/кг; τ_{np} — час перебування матеріалу в трубопроводі, с.

Підставляючи значення (5) в рівняння (3)-(4), отримаємо:

$$T_1 \frac{\partial t}{\partial \tau} + T_{1x} \frac{\partial t}{\partial x} = \theta - t; \quad (6)$$

$$T_2 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + T_{2x} \frac{\partial \theta}{\partial x} = t - \theta, \quad (7)$$

де:

$$T_1 = \frac{m_v c_p}{\alpha \tau \sigma G_3}; \quad T_2 = \frac{m_3 c_3}{\alpha \tau \sigma G_3}; \quad T_{1x} = \frac{c_p G_v H}{\alpha \tau \sigma G_3};$$

$$T_{2x} = \frac{c_p H}{\alpha \tau \sigma}.$$

Оскільки система рівнянь (6), (7) строгого аналітичного розв'язку немає, скористаємося наближеним способом рішення. Для еталонного режиму $\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0\right)$ система рівнянь буде мати вигляд:

$$T_{1x} \frac{\partial t}{\partial x} + t = \theta; \quad (8)$$

$$T_{2x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \theta = t. \quad (9)$$

Об'єднуючи рівняння (8) і (9) в одне (підставкою значення t його похідної в рівняння (8)) отримаємо:

$$A \frac{d^2 \theta}{dx^2} + B \frac{d\theta}{dx} = 0, \quad (10)$$

де: $A = T_{1x} T_{2x}$; $B = T_{1x} + T_{2x}$

Розв'язок рівняння (10) за граничних умов:

$x = 0$; $\theta = \theta_1$; $\frac{d\theta}{dx} = V_1$, має вигляд:

$$\theta(x) = \theta_1 + V_1 \frac{A}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{A} x}\right). \quad (11)$$

Значення похідної $\frac{d\theta}{dx} = V_1$ отримаємо з рівняння (9)

$$V_1 = \frac{d\theta}{dx_{x=0}} = \frac{1}{T_{2x}} (t_1 - \theta_1), \quad (12)$$

де: t_1 , θ_1 — значення температур на вході в трубопровід.

Аналогічно отримаємо розв'язок рівняння для температури теплоносія:

$$A \frac{d^2 t}{d\tau^2} + B \frac{dt}{d\tau} = 0, \quad (13)$$

Яке за початкових умов: $x=0$; $t=t_1$;
 $V_2 = \frac{dt}{dx} = -\frac{1}{T_{1x}}(t_1 - \theta_1)$, буде мати такий вигляд:

$$t(x) = t_1 + V_2 \frac{A}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{A}x} \right). \quad (14)$$

Рівняння (11) і (14) визначають розподіл температури потоків зерна і теплоносія в сталому режимі: $t_1 = \text{const}$, $\theta_1 = \text{const}$. При $x = H$ з рівнянь (11) і (14) отримуємо значення температури зерна і теплоносія на виході пневмотракта: t_2 і θ_2 , за якими можна визначити витрати теплоти на нагрів зерна:

$$Q_u = G_v c_p (t_2 - t_1), \quad (15)$$

А при охолодженні кількість теплоти яку відбирає від зерна охолоджуюче повітря:

$$Q_u = G_v c_p (\theta_2 - \theta_1), \quad (16)$$

Для визначення градієнтів температури $\left(\frac{\partial t}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$ в рівняннях (6) і (7) про диференціюємо залежності (11) і (14):

$$\frac{dt(x)}{dx} = V_2 e^{-\frac{B}{A}x}, \quad (17)$$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = V_1 e^{-\frac{B}{A}x}. \quad (18)$$

Підставляючи отримані значення (17) в рівняння (6) і (18) і рівняння (7) після відповідних перетворень матимемо:

$$\begin{cases} T_1 \frac{dt}{d\tau} + t - \Delta T_1 e^{-\frac{B}{A}x} = \theta, \\ T_2 \frac{d\theta}{d\tau} + \theta - \Delta T_1 e^{-\frac{B}{A}x} = t. \end{cases} \quad (20)$$

Розв'язок системи рівнянь (19) — (20) за початкових умов:

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad t = t_0, \quad \theta = \theta_0, \\ \frac{dt}{d\tau} = -\frac{1}{T_1} \left(\Delta T_0 - \Delta T_1 e^{-\frac{B}{A}x} \right), \\ \frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{1}{T_2} \left(\Delta T_0 - \Delta T_1 e^{-\frac{B}{A}x} \right), \end{aligned}$$

отримаємо у вигляді:

$$t(\tau, x) = t_0 - \frac{A}{B} \frac{1}{T_1} \left(\Delta T_0 - \Delta T_1 e^{-\frac{B}{A}x} \right) \left(1 - e^{-\frac{B}{A}\tau} \right), \quad (21)$$

$$\theta(\tau, x) = \theta_0 - \frac{A}{B} \frac{1}{T_2} \left(\Delta T_0 - \Delta T_1 e^{-\frac{B}{A}x} \right) \left(1 - e^{-\frac{B}{A}\tau} \right), \quad (22)$$

де, $\Delta T_0 = t_0 - \theta_0$, $\Delta T_1 = t_1 - \theta_1$.

Таким чином отримані рівняння (21) і (22) визначають розподіл температур теплоносія і зерна за довжиною пневмотракта для будь якого моменту часу.

Отримані залежності відрізняються від відомих тим, що дозволяють одним рівнянням визначити перехідний процес для фактичного розподіленого об'єкта.

Графічна інтерпретація визначених залежностей представлена на рис. 1 і рис. 2.

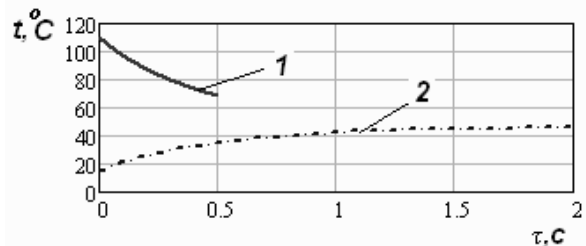


Рис. 1. Залежність зміни температури в пневмоканалі в часі: 1 — температура повітря, 2 — температура зерна

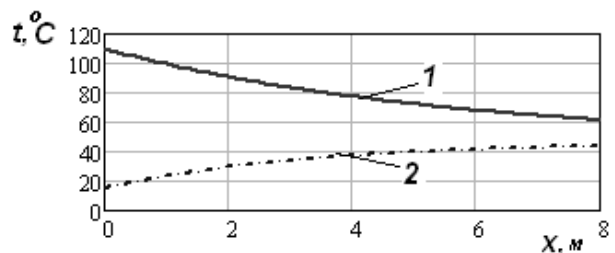


Рис. 2. Залежність зміни температури в пневмоканалі за координатою: 1 — температура повітря, 2 — температура зерна

Висновки:

- Отримано математичні залежності зміни температури зерна і теплоносія при прямоточному русі в пневмоканалі за висотою та в часі.
- Отримано динамічну модель теплообміну зерна з теплоносієм можна використовувати для розробки системи керування процесом нагріву.

Література

- Муштаев В.И. Сушка в условиях пневмотранспорта / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов, А.С. Тимонина. — М.: Химия, 1984. — 232 с.
- Бабуха Г.Л. Механика и теплообмена потоков полидисперсной газозвеси / Г.Л. Бабуха, М.И. Рабинович. — К.: Наук. думка, 1969. — 218 с.
- Горбис З.Р. Теплообмен и гидродинамика дисперсных сквозных потоков. — М.: Энергия, 1970. — 424 с.

4. Рабинович Г.Д. Расчет теплообменного аппарата типа «газовзвесь» // сб. тепло и массообмен в сушильных и термических процессах. – Минск.: Наука и техника, 1966. – С. 164 - 185.

5. Шевяков А.А. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов / А.А. Шевяков, Р.В. Яковлева. – М.: Машиностроение, 1968. – 314 с.

Аннотация

Моделирование динамики нагрева и охлаждения зернопродуктов в режиме пневмотранспортера

Б.І. Котов, Р.А. Калиниченко, В.В. Кифяк

Возможность термообработки дисперсных материалов, которые движутся в прямоточном газовом потоке есть известна. Теплообмен в движущемся потоке газа характеризуется высокой интенсивностью передачи теплоты от газа-теплоносителя к материалу и наоборот от нагретого материала к охлаждаемому воздуху. Однако отсутствие надежной математической модели, которая отображает динамику теплообмена в объектах с распределенными параметрами, не позволяет определять рациональные параметры и режимы таких установок, сдерживает развитие системы управления. Для решение этого вопроса в статье разработана математическая модель нагрева зерна в условиях пневмотранспортера с учетом распределенности параметров. Основой для модели выбрано уравнения теплового баланса, которыми можно описывать процессы конвективного теплообмена для выделенного элемента трубы. полученные уравнения которые определяют распределение температур теплоносителя и зерна по длине пневмотракта для любого момента времени. При этом новизной есть возможность одним уравнением определить переходной процесс для фактического распределенного объекта. Результатом статьи есть установленные математические зависимости изменения температуры зерна и теплоносителя при прямоточном движении в пневмоканале по высоте и во времени. Полученную динамическую модель теплообмена зерна с теплоносителем можно использовать для разработки систем управления процессом нагрева, что значительно повысит его эффективность.

Ключевые слова: *нагрев, зерно, динамика, пневмотранспорт, теплообмен.*

Abstract

Modelling of heating and cooling dynamics of grain products in pneumatic mode

B.I.Kotov, R.A.Kalinichenko, V.V.Kyfyak

The ability to heat treatment of disperse materials that move in a continuous-flow gas stream is known. Heat transfer in a moving gas stream has a high intensity heat transfer from the coolant gas to the material, and vice versa from the heated material to the air-cooled. However, the absence of a reliable mathematical model that reflects the dynamics of heat transfer in distributed parameter objects, does not allow to determine the rational parameters and modes of such plants, hinders the development of control systems. To address this issue in the article the mathematical model of heating of grain in the air conveyor conditions, taking into account parameters of the distribution. The basis for the model selected heat balance equation, which can describe the processes of convective heat transfer to the selected pipe element. These equations determine the distribution of the coolant temperature and grain length pnevmotrakta for any time. This novelty is the possibility of one equation to determine the transition process to actually distributed object. The result of the article is to establish mathematical relationships and changes in grain temperature of coolant at a continuous-flow movement in pnevmokanale height and time. The resulting dynamic model of heat exchange with the coolant grain can be used for the development of control systems heating process that greatly enhance its effectiveness.

Keywords: *heating, grain, dynamics, air transport, heat transfer.*

Представлено: Л.М.Тіщенко / Presented by: L.Tishchenko
Рецензент: О.І.Завгородній / Reviewer: O.I.Zavgorodniy
Подано до редакції / Received: 25.11.2015