

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНА У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ПНЕВМОКАНАЛІ ПРИ ПЕРІОДИЧНІЙ ЗМІНІ ШВИДКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ ЗА ВИСОТОЮ

### MATHEMATIC MODELING THERMAL TREATMENT OF GRAIN IN VERTICAL PNEUMATIC CHANNEL PERIODICALLY CHANGE THE SPEED COOLANT HEIGHT

*Мета.* Моделювання одного з елементів процесу теплової обробки зерна, а саме зміни температури твердої і газової фази у пневматичному каналі із періодично змінною швидкістю теплоносія. Одержання розрахункових формул для розрахунку розподілу температури двофазного потоку за висотою пневмоканалу.

*Методи.* Залежності зміни температури зерна і теплоносія за висотою пневматичного каналу визначені з використанням рівнянь і умов теплового балансу для статичного режиму, складених при загальноприйнятих спрощуючих припущеннях. Обчислення і графічна інтерпретація виконані у програмному середовищі MathCAD.

*Результати.* Складено математичну модель процесу теплообміну дисперсного матеріалу в прямокутному пневматичному каналі із періодично-змінною площею перетину, що забезпечує зміну в напрямку руху швидкості газового теплоносія за наближено гармонічним законом. Отримані наближені розрахункові формули для визначення розподілу температури зерна і теплоносія за висотою пневматичного каналу в залежності від основних параметрів процесу: температури теплоносія і величини його подачі, а також швидкості руху і частоти її зміни.

*Висновки.* Визначено пульсуючий характер зміни температури теплоносія при її зменшенні в процесі нагріву зерна. Показано можливість інтенсифікації теплообміну за рахунок періодичної зміни рушійної сили процесу – температурного напору (різниці температури теплоносія і поверхні матеріалу).

*Ключові слова:* нагрівання зерна, теплообмін, теплоносій, пневмоканал, змінна швидкість потоку.

#### Вступ

Термообробку зерна зазвичай проводять для інтенсифікації процесу подальшого сушіння зерна в зерносушарках, дезінсекції зерна перед тимчасовим зберіганням або охолодження зерна атмосферним повітрям після сушарки.

Враховуючи, що термообробка передуює процесу сушіння або виконується після її, доцільно проводити сумісно з операцією транспортування зерна до сушарки, а також (охолодження) після сушіння при транспортуванні до місця зберігання.

Термообробка зерна в режимі пневмотранспорту має значні переваги в плані інтенсифікації процесу теплообміну і можливості передачі до зерна значної кількості теплоти.

Доцільність попереднього нагрівання зерна для інтенсифікації процесу сушіння доведено в роботах [1, 2] та інших. Ефективність нагрівання зерна в режимі пневмотранспорту визначено у працях [3, 4]. Однак цей метод має і суттєвий недолік — невеликий термін перебування матеріалу в пневмотракті. В роботах [5] розглянуто можливість інтенсифікації міжкомпонентного теплообміну в двофазних потоках через гальмування

твердої фракції. Теоретично і експериментально визначено, що при збільшенні частоти пульсації швидкості теплоносія значно збільшується термін перебування матеріалу в пневмоканалі і відповідно збільшення поверхні матеріалу, що бере участь у теплообміні. У результаті збільшується кількість переданої теплоти, інтенсивність і ефективність нагрівання зернового матеріалу. У відомих роботах швидкість переміщення теплоносія змінювалась періодичним перекриттям пневмоканалу, тобто зміною витрат теплоносія, що призводить до прямокутних пульсацій.

У зв'язку з тим, що практично важко досягти строго прямокутних пульсацій, які призводять до зменшення сумарної витрати теплоносія упродовж процесу, доцільно розглянути процес нагріву зерна у вертикальному пневмоканалі при постійних витратах теплоносія, але з періодичною зміною за висотою його швидкості.

Одним із ефективних методів збільшення часу перебування дисперсного матеріалу в пневмоканалі є транспортування матеріалу в каналі із змінною швидкістю теплоносія (наприклад, канал із періодично змінним перетином). У зв'язку з цим є зрозумілим науковий і практичний інтерес до розгляду процесу нагріву

зернового матеріалу у вертикальному потоці теплоносія при періодичній зміні його швидкості.

Мета роботи полягає у створенні і дослідженні математичної моделі процесу нагрівання зерна в режимі пневмотранспортування при періодичних коливаннях швидкості теплоносія.

### Основні результати досліджень

Розглянемо фізичну модель процесу. Пневматичний канал (рисунок 1) являє собою ряд послідовно розміщених у вертикальному напрямку секцій, що мають форму поверхонь обертання, звужених до обох країв (два усічених конуса, спряжених між собою більшими діаметрами).

Нижня частина секції є для потоку теплоносія дифузором (потік розширюється), верхня – конфузором (потік звужується). Звужені перерізи секцій розраховано так, що швидкість теплоносія в них більше швидкості витання, а середні перерізи відповідно розраховані так, що швидкість теплоносія в них дорівнює середній швидкості витання. Усі секції виконано однакового розміру. У вертикальний потік теплоносія (нагрітий газ, повітря), що спрямований знизу вверх, подається дисперсний матеріал (зернопродукти), що складається з частинок однакового розміру (у формі кулі), які рухаються у напрямку теплоносія. Витрати теплоносія  $G_v$  і зерна  $G_3$  передбачаються постійними. Теплота від теплоносія до матеріалу передається конвективно і витрачається тільки на збільшення його температури (випаровування не враховується). У разі охолодження теплота передається від нагрітого матеріалу до охолоджуючого повітря.

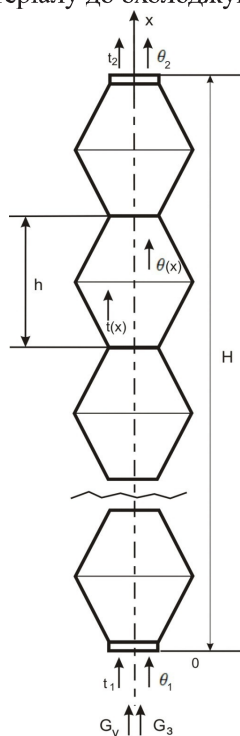


Рисунок 1 — Схема пневмоканалу із періодично змінним перетином

Математичну модель динаміки теплообміну в пневмотранспортуючій установці складемо на основі теплового балансу матеріалу і теплоносія при наступних загальноприйнятих припущеннях [6]:

- теплообмін матеріалу і теплоносія відбувається в квазістаціонарному режимі, конвективним способом, а інші види теплопередачі (випромінюванням, кондуктивно) враховуються коефіцієнтом теплообміну;
- коефіцієнт теплообміну і теплофізичні характеристики зерна і теплоносія від температури не залежать і дорівнюють середнім значенням за процес;
- нагрів зерна безградієнтний;
- втратами теплоти через стінку пневмопровода нехтуємо;
- температура матеріалу і теплоносія на вході в пневмоканал мають постійні значення.

З урахування прийнятих припущень і фізичної картини процесу система рівнянь математичного опису стаціонарного режиму двопоточного теплообмінника може бути записана у вигляді

$$G_n C_n H \frac{dt(x)}{dx} = \alpha F (\theta(x) - t(x)), \quad (1)$$

$$G_3 C_3 H \frac{d\theta(x)}{dx} = \alpha F (t(x) - \theta(x)), \quad (2)$$

де  $t, \theta$  — температура теплоносія і зерна,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $G_n, G_3$  — масові витрати повітря (теплоносія) і зерна,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $C_n, C_3$  — питома теплоємність теплоносія і зерна,  $\text{Дж}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  — коефіцієнт теплообміну,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{C}$ ;  $F$  — поверхня теплообміну (поверхня матеріалу, що знаходиться в об'ємі пневмоканалу,  $\text{м}^2$ );  $H$  — висота пневмоканалу,  $\text{м}$ ;  $x$  — координата поздовж руху потоків,  $\text{м}$ .

Стаціонарним режимом процесу теплообміну вважаємо такий процес, при якому в будь-якому перерізі по висоті каналу зберігаються постійними у часі температура, концентрація матеріалу і витрати. Таким чином, рівняння (1) і (2) описують розподіл температури двофазного потоку за висотою пневмоканалу.

Представимо поверхню дисперсного матеріалу в пневмоканалі у вигляді кульок масою  $m_3$  з еквівалентним діаметром  $d_3$ , загальною масою  $m_3$

$$F = f \cdot m_3, \quad (3)$$

де  $f$  — питома поверхня монодисперсного матеріалу,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $m_3$  — маса матеріалу,  $\text{кг}$ .

Питома поверхня монодисперсного матеріалу, що складається із сферичних частинок, визначається співвідношенням

$$f = \frac{6}{\rho_3 d_3}, \quad (4)$$

де  $\rho_3$  — густина матеріалу зернини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $d_3$  — діаметр (еквівалентний) зернини,  $\text{м}$ .

Масу матеріалу, що знаходиться у пневмоканалі можна визначити із величини продуктивності  $G_3$  (витрати зерна)

$$m_3 = G_3 \tau, \quad (5)$$

де  $\tau$  – час перебування матеріалу в апараті, с.

Швидкість повітря у пневмоканалі  $v = \frac{G_n}{S\rho_n}$ , де  $S$  –

площа перерізу (середня),  $m^2$ . Об'єм каналу  $V_k = HS$ , або з урахуванням подвійних (спарених) конусних елементів

$$V_k(n) = \frac{\pi}{3}(R^3 + r^3 + R \cdot r) \cdot 2 \cdot h_i \cdot n, \quad (6)$$

де  $R, r$  – радіус найбільшого і найменшого перерізу секції пневмоканалу, м;  $h = 2 h_i$ , – висота секції, м;  $n$  – кількість секцій, шт;  $H = 2 h_i n$  – загальна висота пневмоканалу, м.

Запишемо рівняння (1) і (2) з урахуванням залежностей (3)–(6) у вигляді

$$\frac{dt(x)}{dx} = \frac{k_1}{v(x)}(\theta(x) - t(x)), \quad (7)$$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = -k_2(\theta(x) - t(x)), \quad (8)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{\alpha\tau(\omega) \cdot 6 \cdot G_3}{C_n \rho_3 \rho_n d_3 V_k}, \quad k_2 = \frac{\alpha\tau(\omega) \cdot 6}{C_3 \rho_3 d_3 H}.$$

Комплекс  $\alpha\tau(\omega)$ , як відомо, залежить від частоти зміни швидкості теплоносія, і цю залежність можна апроксимувати емпіричною формулою

$$\alpha\tau(\omega) = 500 + 400 \cdot \sqrt{\omega} \quad (9)$$

при зміні у межах від 0 до 20.

В нашому випадку  $\omega = 1/h_i$ ,  $h_i = 0,1-0,3$ .

Для розв'язку системи рівнянь (7) і (8) віднімемо від рівняння (7) рівняння (8)

$$\frac{d}{dx}[t(x) - \theta(x)] = -\left[\frac{k_1}{v(x)} + k_2\right] \times (t(x) - \theta(x)). \quad (10)$$

Розділяючи змінні в рівнянні (10) і інтегруючи отриманий вираз, матимемо

$$\ln|t(x) - \theta(x)| = -\int \left(\frac{k_1}{v(x)} + k_2\right) dx + c1. \quad (11)$$

Приймаємо в першому наближенні зміну швидкості теплоносія за висотою за гармонічним законом

$$v(x) = A_0 + A \cdot \sin \alpha x. \quad (12)$$

Тоді кінцевий розв'язок рівняння (11) матиме вигляд

$$\ln(t(x) - \theta(x)) = \frac{2k_1 \arctg \left[ \frac{A}{\sqrt{A_0^2 - A^2}} \right]}{\omega \sqrt{A_0^2 - A^2}} + \frac{2k_1 \arctg \left[ \frac{A + A_0 \operatorname{tg} \left[ \frac{\omega \cdot x}{2} + A \right]}{\sqrt{A_0^2 - A^2}} \right]}{\omega \sqrt{A_0^2 - A^2}} - k_2 x + c1 \quad (13)$$

Сталу інтегрування  $c1$  визначимо із початкової умови:  $x=0; t(0) - \theta(0) = t_0 - \theta_0$ ,

$$c1 = \ln(t_0 - \theta_0). \quad (14)$$

$$t(x) = \theta(x) + \left[ \frac{2k_1 \arctg \left[ \frac{A}{\sqrt{A_0^2 - A^2}} \right]}{\omega \sqrt{A_0^2 - A^2}} - k_2 x - \Delta T_0 \exp \left[ \frac{2k_1 \arctg \left[ \frac{A + A_0 \operatorname{tg} \left[ \frac{\omega \cdot x}{2} + A \right]}{\sqrt{A_0^2 - A^2}} \right]}{\omega \sqrt{A_0^2 - A^2}} \right] \right] \quad (15)$$

де  $\Delta T_0 = t_0 - \theta_0$ .

Підставляючи значення  $t(x)$  з (15) в рівняння (8) матимемо

$$\text{де } F(x) = \frac{2k_1 \arctg \left[ \frac{A}{\sqrt{A_0^2 - A^2}} \right]}{\omega \sqrt{A_0^2 - A^2}} - k_2 x - \frac{2k_1 \arctg \left[ \frac{A + A_0 \operatorname{tg} \left[ \frac{\omega \cdot x}{2} + A \right]}{\sqrt{A_0^2 - A^2}} \right]}{\omega \sqrt{A_0^2 - A^2}} \quad (16)$$

Рішення рівняння (16) запишемо у вигляді

$$\theta(x) = \theta_0 + k_2 \Delta T_0 \int_0^x e^{F(s)} ds \quad (17)$$

Температуру теплоносія (змінну за висотою) отримаємо з рівняння (15), підставивши в нього рівняння (17)

$$t(x) = \theta_0 + k_2 \Delta T_0 \int_0^x e^{F(s)} dx + \Delta T_0 e^{F(x)} \quad (18)$$

Таким чином, отримали інтегральні рівняння, що описують процес розподілу температури зерна і теплоносія

за висотою пневматичного тракту при періодичній зміні швидкості теплоносія.

На рисунку 2 зображено графічну інтерпретацію отриманих аналітичних залежностей.

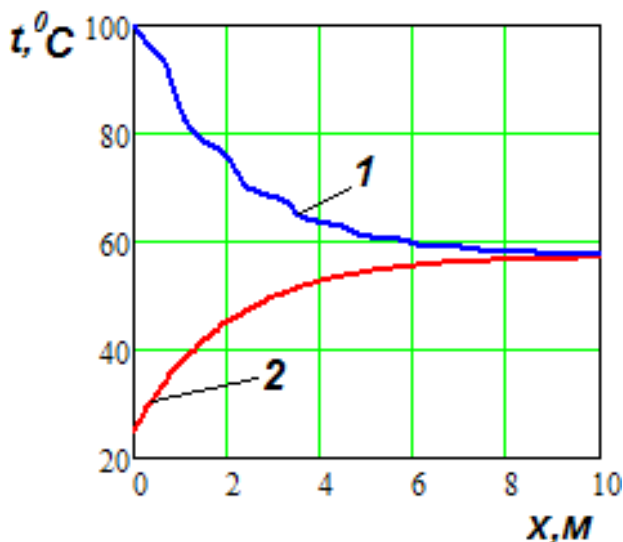


Рисунок 2 — Зміна температури за висотою пневмоканалу: 1 – теплоносія, 2 – зерна

### Висновки

Розроблено замкнену математичну модель нагріву зерна в умовах пневмотранспортування при пульсаціях швидкості теплоносія.

Показано можливість інтенсифікації теплообміну для підвищення енергоефективності установки для термообробки зерна.

### Література

1. Гапонюк, О.І. Активне вентилування та сушіння зерна / О.І. Гапонюк, М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич та ін. — Одеса: ВНВ, 2014. — 328 с.
2. Сорочинский, В.Ф. Повышение эффективности конвективной сушки зерна на основе интенсификации тепломассообменных процессов / В. Ф. Сорочинский. Дис. д.т.н. — М., 2003. — 358 с.
3. Зимин, Е.М. Пневмотранспортные установки для вентилирования, транспортирования и сушки зерна / Е.М. Зимин. — Киров: Изд. КГСХА, 2000. — 215 с.
4. Котов, Б.І. Моделювання динаміки нагріву та охолодження зернопродуктів в режимі пневмотранспортера / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, В. В. Кифяк // Інженерія природокористування. — 2015. — № 1 (3). — С. 40—43.
5. Котов, Б. І. Нагрівання зерна в протитечійному режимі із штучним гальмуванням гравітаційного руху / Б. І. Котов, В. В. Кифяк, В. О. Лісецький // Науковий вісник Ніжинського агротехнічного університету. — 2009. — С. 199—203.
6. Котов, Б. І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, М.І. Липунов //

Конструювання, виробництво та експлуатація с-г машин. — 2012. — Вип. 42. — С. 340—346.

### References

1. Gaponyuk, O.I. Aktivne ventylyuvannya ta sushynnya zerna / O. I. Gaponyuk, M.V. Ostapchuk, H.M. Stankevich ta in. — Odesa : VNV, 2014. — 328 s.
2. Sorochinskiy, V. F. Povysheniye effektivnosti konvektivnoy sushki zerna na osnove intensivatsii teplomassoobmennyykh protsessov / V.F. Sorochinskiy. Dis. d.t.n. — M., 2003. — 358 s.
3. Zimin, Ye.M. Pnevmotransportnye ustanovki dlya ventilirovaniya, transportirovaniya i sushki zerna / Ye.M. Zimin—Kirov: Izd. KGSKHA, 2000. — 215 s.
4. Kotov, B.I. Modelyuvannya dynamiky nagrivu ta oholodzhennya zernoproduktiv v rezhymi pnevmotransportera / B.I. Kotov, R.A. Kalinichenko, V.V. Kyfyak // Inzheneriya pryrodokorystuvannya. — 2015. — № 1 (3). — S. 40—43.
5. Kotov, B.I. Nagrivannya zerna v protitechiynomu rezhimi iz shtuchnykh halmuvanniam hravitatsiynoho rukhu / B.I. Kotov, V.V. Kyfyak, V.O. Lisetskiy // Naukovy visnyk Nizhinskogo agrotekhnichnogo universytetu. — 2009. — S.199—203.
6. Kotov, B. I. Analitichne vyznachennya dynamichnykh teplovologisnykh rezhymiv zernosusharok bezperervnoi diyi / B.I. Kotov, R.A. Kalinichenko, M.I. Lipunov // Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya s-g mashyn. — 2012. — Vyp. 42. — S. 340—346.

Надійшла 15.01.2016 року

УДК674.047

## Математическое моделирование термообработки зерна в вертикальном пневмоканале при периодическом изменении скорости теплоносителя по высоте

Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, О.В. Курганський

Цель. Моделирование одного из элементов процесса тепловой обработки зерна, а именно изменения температуры твердой и газовой фазы в пневматическом канале с периодическим изменением скорости газа (теплоносителя). Получение расчетных формул для определения распределения температуры двухфазного потока по высоте пневмоканала.

Методы. Зависимости изменения температуры зерна и теплоносителя по высоте пневматического канала определены при использовании уравнений и условий теплового баланса для статического режима, полученных при общепринятых упрощающих допущениях.

Вычисления и графическая интерпретация выполнены в программной среде *MathCAD*.

Результаты. Составлена математическая модель процесса теплообмена дисперсного материала в прямооточном пневматическом канале с периодически изменяющейся площадью сечения, что обеспечивает изменение скорости движения теплоносителя в направлении перемещения по приближенному гармоническому закону. Получены приближенные расчетные формулы для определения распределения температуры зерна и теплоносителя вдоль пневматического канала в зависимости от основных параметров процесса: температуры теплоносителя, его подачи, скорости и частоты ее изменения по высоте (шага сужения).

Выводы. Определен пульсирующий характер изменения температуры теплоносителя при его уменьшении в процессе термообработки зерна. Показана возможность интенсификации процесса теплообмена за счет периодического изменения температурного напора (разницы температуры теплоносителя и поверхности).

*Ключевые слова:* нагрев зерна, теплообмен, теплоноситель, изменение скорости потока.

UDC674.047

## Mathematical modeling thermal treatment of grain in vertical pneumatic channel periodically change the speed coolant height

**B. I. Kotov, R.A.Kalinichenko, O.V.Kurgansky**

Purpose. Modelling of one of elements of process of thermal machining of grain, namely change of temperature firm and a gas phase in the pneumatic channel with periodic

change of speed of gas (heat-transfer agent). Reception of design formulas for definition of distribution of temperature for definition of distribution of temperature of a two-phase stream on pneumochannel altitude.

Methods. Dependences of change of temperature of grain and heat-transfer agent on altitude of the pneumatic channel are defined at use of the equations and conditions of thermal balance for the static regime, gained at standard the simplifying assumptions. Scalings and graphical interpretation are executed in programm medium *MathCAD*.

Results. The mathematical model of process of heat exchange of a disperse material in the direct-flow pneumatic channel with periodically - the changing square of cross-section that provides change of speed of traffic of heat-transfer agent in a moving direction under the approached harmonious law is made. The approached design formulas for definition of distribution of temperature of grain and heat-transfer agent along the pneumatic channel depending on process key parameters are gained: to temperature of heat-transfer agent, its supply, speed and frequency of its change on altitude (a cotraction step).

Conclusions. Pulsing character of change of temperature of heat-transfer agent is defined at its decrease in the course of grain heat treatment. Possibility of an intensification of process of heat exchange at the expense of periodic change of a temperature pressure (a difference of temperature of heat-transfer agent and a surface) is shown.

*Keywords:* grain heating, heat exchange, heat-transfer agent, change of speed of a stream.