

flat sieves with a zigzag arrangement of oblong holes, which activate their interaction with particles of the grain mixture in the longitudinal and transverse directions and to match the structural parameters of the sieve with the operating parameters of the oscillations.

grain, grain material, cleaning, sieve, separator, intensification, separation, efficiency, intralayer processes, activation, zigzag

Одержано (Received) 28.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.3:66.081.3+537.226

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.202-214>

Б.І. Котов, проф., д-р техн. наук

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», сел. Глеваха, Україна

В.Г. Мироненко, проф., д-р техн. наук, **С.П. Степаненко**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.

Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України, сел. Глеваха, Україна

В.О. Грищенко, доц., канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Ю.І. Панцир, доц., канд. техн. наук, **І.Д. Герасимчук**, доц., канд. техн. наук

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», сел. Глеваха, Україна

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання процесу сушіння матеріалу в барабанній сушарці, як об'єкта автоматичного керування

В даній роботі розроблено математичний опис сушіння в барабанних сушарках у вигляді системи диференціальних рівнянь, що моделює залежність температури та вологості матеріалу від параметрів сушильного агента та конструктивних характеристик. Створено спрощені моделі в MatlabSimulink. Запропоновано концепцію автоматичного керування з компенсацією перехресних зв'язків, що підвищує ефективність регулювання, стабільність роботи сушарки та оптимізує енергоспоживання.

процес сушіння, моделювання, зернові матеріали, барабанна сушарка, автоматичне керування

Постановка проблеми. Сушіння рослинних матеріалів є одним із важливих і енергоємним процесом післязбиральної обробки урожаю рослинних культур. Враховуючи широкий асортимент продукції, яка потребує зневоднення для тривалого зберігання, найбільш універсальними установками є прямоточні пневмобарабанні агрегати. Сама за універсальності стосовно різноманіття матеріалів, які можна висушувати, в обертовому барабані, при різній початковій вологості і засміченості, пневмобарабанні агрегати знайшли широке застосування і розповсюдження в різних країнах і галузях виробництва. Але не зважаючи на суттєві переваги і розповсюдження пневмобарабанних агрегатів, процеси регулювання

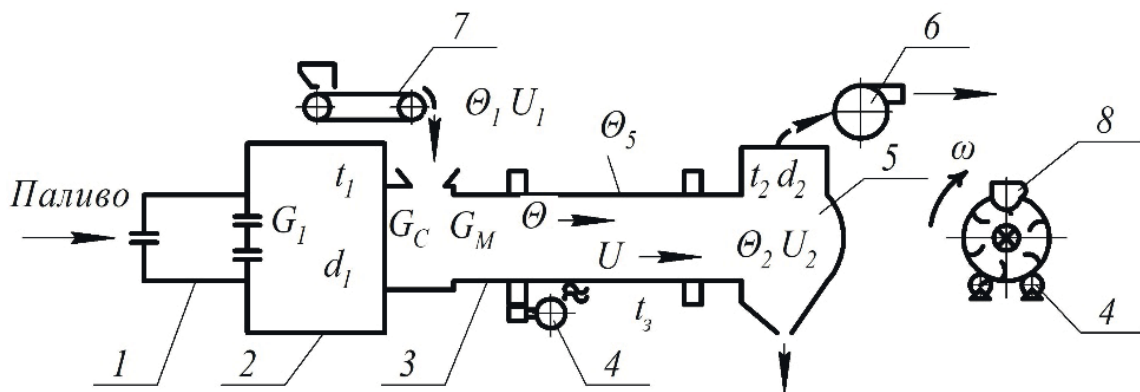
© Б.І. Котов, В.Г. Мироненко, С.П. Степаненко, В.О. Грищенко, Ю.І. Панцир, І.Д. Герасимчук, 2024

температурно-вологісних режимів не набули досконалої форми, незважаючи на значні досягнення в галузі цифрової автоматики. Визначення алгоритму раціональними (оптимальними) режимами сушіння нерозривно пов'язано із складністю математичного опису процесів, тепло- і масообмінних сушильного агента елементів і конструкцій барабанів з матеріалом і процесом його транспортування, при чергуванні відлежування частинок та контактування їх з сушильним агентом. Взаємопов'язаність тепломасообмінних і механічних процесів значно утруднює вибір способу автоматичного керування процесом сушіння в обертовому барабані. Для вибору енергоефективного способу автоматизації керування режимом сушки, необхідно мати математичний опис динаміки зміни параметрів сушильного агента і матеріалу, який визначає усі впливові зв'язки між регулюємими і регулюючими параметрами та зовнішніми збуреннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологію сушіння в барабанних агрегатах, методи розрахунків і вибори параметрів режиму описано в монографіях [1-3], але у цих роботах описана статика процесу і визначення показників функціонування барабанних сушарок. Методи підвищення ефективності процесу сушіння рослинного матеріалу в барабанних сушарках висвітлені в роботах [4-6]. Основні положення сушіння, які можна використати в теоретичних дослідженнях наведені в роботах [3-12]. Висвітлені математичні моделі, являють собою системи нелінійних рівнянь, які адекватно описують процеси сушіння за умови незмінності регулюючих параметрів: витрат матеріалу і сушильного агента, тому потребують числових методів розрахунку. У зв'язку з цим виникає задача математичного опису динаміки зміни основних параметрів сушарки при змінних регулюючих параметрах.

Постановка завдання. Визначення динаміки зміни параметрів пневмобарабанної сушарки та статичні характеристики процесу придатних для синтезу систем автоматичного керування режимами функціонування сушильного агрегата.

Виклад основного матеріалу. Процес сушіння в пневмобарабанних сушарках з подовжнім рухом сушильного агента і матеріалу – плановий процес з розподіленими параметрами. В процесі переміщення вздовж обертового барабана матеріал періодично пересипається з лопатевої насадки, і при цьому частинки контактують з сушильним агентом. Температура і вологість матеріалу та сушильного агента змінюються за довжиною барабана. Технологічно-конструктивна схема на рис. 1.



1 – топка; 2 – камера змішування; 3 – барабан; 4 – привод барабана;
5 – вивантажувальна частина; 6 – димовсмоктувач; 7 – живильник; 8 – насадка.
Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема пневмобарабанної сушарки

Джерело: розроблено авторами

Для побудови математичної моделі процесу сушіння зробимо ряд спрощуючих припущень. Параметри матеріалу і сушильного агента розподілені за довжиною барабана і зосередженні у поперечному перетині теплофізичні характеристики матеріалу і сушильного агента і елементів конструкції барабана постійні і дорівнюють середнім за процес значенні. Теплопередача випромінюванням, теплопровідністю і конвекцією враховуються коефіцієнтами теплообміну.

Швидкість зміни вологовмісту матеріалу можна прийняти лінійно залежній від температурного напору (різниці температур сушильного агента і матеріалу) [12].

Правомірність такого підходу впливає з аналізу рівняння кінетики О. Ликова [10]:

$$\alpha F(t - \theta) = m_M r \frac{dU}{d\tau} (1 + R_B) \quad (1)$$

де $R_B = \frac{cd\theta}{rdU}$ – критерій Ребіндера;

m_M – маса тіла (об'єму дисперсного матеріалу, $m_M = V_M \rho_M$);

r – питома теплота пароутворення;

C – питома теплоємність матеріалу;

F – поверхність матеріалу (теплообміну);

α – коефіцієнт складного теплообміну;

U – вологовміст матеріалу;

t_1, θ – температура сушильного агента і матеріалу;

τ – час.

Температура сушильного агента; t не є постійною. Тому запишемо рівняння теплового балансу для сушильного агента

$$\alpha F(t - \theta) = m_C C_P \frac{dt}{d\tau} \quad (2)$$

де m_C – маса сушильного агента в об'ємі барабана; C_P – питома теплоємність сушильного агента при сталому тиску

Рівняння теплового балансу для матеріалу з урахуванням очевидного співвідношення:

$$-\frac{dU}{d\tau} = \frac{C_M}{rR_B} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad (3)$$

можна записати у вигляді:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\alpha F}{C_M m (1 + R_B^{-1})} (t - \theta) \quad (4)$$

Рівняння матеріального балансу для сушильного агента

$$m_M \frac{dd}{d\tau} = -m_M \frac{dU}{d\tau} \quad (5)$$

де d – вологовміст сушильного агента; m_M – маса матеріалу в барабані

Розкриваючи повні диференціали параметрів (U, θ, t, d) в рівняннях (1,2,4,5) ($dT = \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial T}{\partial y} dy$) і враховуючи, що $\frac{dy}{d\tau} = V$, (де V – швидкість переміщення потоку матеріалу, сушильного агента; y – координата довжини), матимемо після перетворень

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + V_M \frac{\partial \theta}{\partial y} = k_\theta(t - \theta); \quad k_\theta = \frac{\alpha F}{C_M m(1 + R_B^{-1}) m_M}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_C \frac{\partial t}{\partial y} = k_t(t - \theta); \quad k_t = \frac{\alpha F}{m_C C_P}; \quad (7)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} + V_M \frac{\partial U}{\partial y} = k_C(t - \theta); \quad k_C = \frac{\alpha F}{r R_B m_M}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + V_C \frac{\partial d}{\partial y} = -\frac{m_M}{m_C} \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + V_M \frac{\partial U}{\partial y} \right); \quad (9)$$

де τ – питома поверхня матеріалу.

Отримана система рівнянь в частинних похідних визначає зміну параметрів матеріалу і сушильного агента в часі і за координатою. Втрати теплоти барабаном в оточуюче середовище, можна врахувати збільшенням величини питомої теплоти пароутворення ($r' = r + \Delta r$).

Оскільки система рівнянь (8-9) строгого аналітичного розвитку немає, скористуємось наближеним методом дослідження [12].

Для стаціонарного режиму сушіння (після перехідного процесу розігріву) в кожній точці об'єму барабана параметри в часі не змінюються, параметри матеріалу і сушильного агента будуть змінними відносно координати y (довжини барабана). Отже прирівнюючи похідні за часом до нуля отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь.

$$\frac{d\theta}{dy} = k_1(t - \theta) \quad (10)$$

$$\frac{dt}{dy} = k_2(\theta - t) \quad (11)$$

$$\frac{dU}{dy} = k_3(t - \theta) \quad (12)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{k_\theta}{V_M}; \quad k_2 = \frac{k_t}{V_C}; \quad k_3 = \frac{k_C}{V_M};$$

з граничними умовами: $y = 0$; $\theta = \theta_1$; $U = U_1$; $t = t_1$; $d = d_1$; де $(\theta_1, U_1, t_1, d_1)$ параметри матеріалу і сушильного агента на вході в барабан.

Розв'язок рівнянь (10) і (12) за прийнятих граничних умов відносно шуканих змінних $\theta(y)$, $t(y)$, $(t - \theta)(y)$, отримано у вигляді

$$\theta(y) = \theta_1 + \frac{k_1}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}); \quad (13)$$

$$t(y) = t_1 + \frac{k_2}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}); \quad (14)$$

$$\Delta T(y) = t_y - \theta_y = \Delta T_1 e^{-ky}; k = k_1 + k_2. \quad (15)$$

Підставляючи значення $\Delta T(y)$ з рівняння (15) в рівняння (12), матимемо

$$-\frac{dU(y)}{dy} = k_3 \cdot \Delta T_1 e^{-ky}, \quad (16)$$

або після розв'язку (за умови: $y = 0; U = U_1$)

$$U(y) = U_1 - \frac{k_3}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}). \quad (17)$$

Аналогічно для вологовмісту сушильного агента з рівнянь (9) і (16)

$$\frac{dd(y)}{dy} = \frac{m_M}{m_C} k_3 \Delta T_1 e^{-ky}, \quad (18)$$

$$d(y) = d_1 + \frac{k_3}{k} \cdot \frac{m_M}{m_C} \Delta T_1 e^{-ky}. \quad (19)$$

Отриманні рівняння (13,14,17,19) визначають статичну характеристику сушильного барабана, а саме – розподіл параметрів матеріалу і сушильного агента за довжиною барабана в залежності від режиму процесу (t , d , V_M , $V_{c.a.}$, θ_M , U).

Взявши похідні від параметрів $\theta(y)$ і $t(y)$ за координатою і підставивши отримані значення $d\theta/dy$ і dt/dy в рівняння (6) і (7), а (16) і (19) в рівняння (7) і (8) матимемо систему рівнянь, що описує перехідний режим функціонування сушильного барабана:

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = -k_\theta \Delta T_1 e^{-ky} + k_\theta (t - \theta), \quad (20)$$

$$\frac{dt(\tau)}{d\tau} = k_t \Delta T_1 e^{-ky} + k_t (\theta - t), \quad (21)$$

$$\frac{dU(\tau)}{d\tau} = -k_C \Delta T_1 e^{-ky} + k_C (t - \theta), \quad (22)$$

$$\frac{dd(\tau)}{d\tau} = -k_C \frac{m_M}{m_{c.a.}} \Delta T_1 e^{-ky} + k_C (t - \theta). \quad (23)$$

Рівняння системи (20-23) є нелінійними тому, що до коефіцієнтів k_θ, k_t, k_C входить змінна маса матеріалу, величину якої можна визначити через вологовміст матеріалу

$$m_M = m_0 (1 + U), \quad (24)$$

де m_0 – маса абсолютно сухого матеріалу в барабані.

Маса сушильного агента в барабані складається із маси сухого повітря ($m_{оп}$) та маси води видаленої з матеріалу $m_0(U_1 - U)$. Таким чином, враховуючи, що $m_{оп} \ll m_0(u_1 - u)$, масу сушильного агента можна виразити

$$m_{c.a.} = m_0 (U_1 - U) \quad (25)$$

Теплоємність барабана з насадкою можна додати до теплоємності матеріалу, враховуючи те, що він більшість часу знаходиться на поверхні барабана і насадки. Таким чином, коефіцієнти k_θ, k_t, k_c в рівняннях (20-23) можна записати в такому вигляді:

$$k'_\theta = \frac{\alpha F}{C_M^* m_0 (1+U) + C_6 m_6}; \quad (26)$$

$$k'_t = \frac{\alpha F}{C_{ca} m_0 (U_1 - U)}; \quad (27)$$

$$k'_c = \frac{\alpha F}{r R_B m_0 (1+U)}; \quad (28)$$

$$k = \frac{k_\theta}{V_M} + \frac{k_t}{V_{ca}}, \quad (29)$$

де $C_M^* = C_M (1 + R_B^{-1})$; C_6, m_6 – питома теплоємність матеріалу барабана та його маса.

Сформульована система нелінійних рівнянь (20–23) із співвідношеннями (26–29), при початкових умовах: $\tau = 0$; $t = t_1$; $\theta = \theta_1$; $U = U_1$; $d = d_1$; $y = 0$; $V_M = V_1$; $V_{ca} = V_{ca1}$ визначає динамічні характеристики сушильного барабана (зміну в часі параметрів сушильного процесу) з урахуванням розподіленості за довжиною сушильного тракту і може бути розв’язана в комп’ютерних середовищах *MathCad* або *MatLab* (остання програма має переваги).

Розв’язком системи нелінійних диференціальних рівнянь (у звичайних похідних) (20–23) визначається зміна параметрів сушильного агента і матеріалу в часі та за координатою.

Розроблена модель процесу сушіння в середовищі *MatLabSimulink*, схема наведена на рис. 2.

Величина маси сухого матеріалу в барабані залежить від частоти обертання барабана $m_0(\omega)$.

Задача керування процесом сушіння полягає у забезпеченні висушування вологого матеріалу до заданої вологості при певній продуктивності установки по сухому матеріалу і не перевищенні температури матеріалу критичного значення. Основним збуренням процесу є зміна початкової вологості матеріалу. Основна регулюєма величина процесу – вологість матеріалу на виході барабана і контролюєма температура сухого матеріалу.

На рис. 3 – рис. 5 наведено розподіл параметрів зерна і сушильного агента за довжиною барабана зерносушарки СЗПБ-2 та залежність швидкості зневоднення зерна в барабані сушарки СЗПБ-2 від різниці температур сушильного агента і зерна.

Тому для аналізу і вибору способу керування процесом сушіння більш інформативною моделлю процесу сушіння буде структурна модель динаміки теплових процесів в барабанній сушарці, на основі лінеаризації нелінійних рівнянь шляхом відомої процедури розкладення в ряд Тейлора навколо точки усталеного процесу Z_0 [15] та заміною змінних у часі параметрів (t, θ, U) через їх прирости відносно встановлених (статичних) значень ($Z = Z_0 + \Delta Z$). Використовуючи лінеаризації складових рівнянь ($e^{-ky} = 1 - ky$; $\frac{1}{1+U} = c - bU$), та заміну змінних: $U = U_0 + \Delta U$; $t = t_0 + \Delta t$; $\theta = \theta_0 + \Delta \theta$, після підстановки отриманих значень в рівняння (20 і 22), множення і нехтування складовими другого порядку малосності, віднімання рівнянь

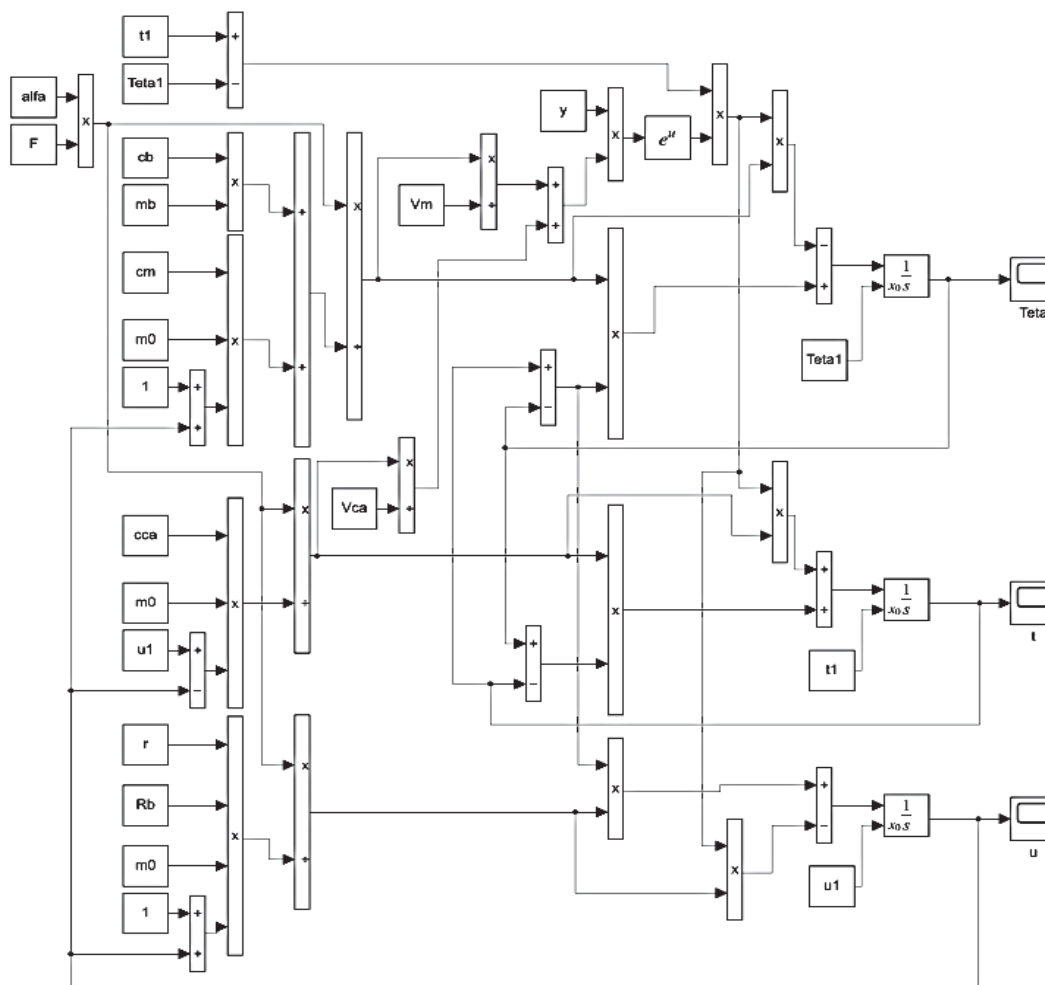
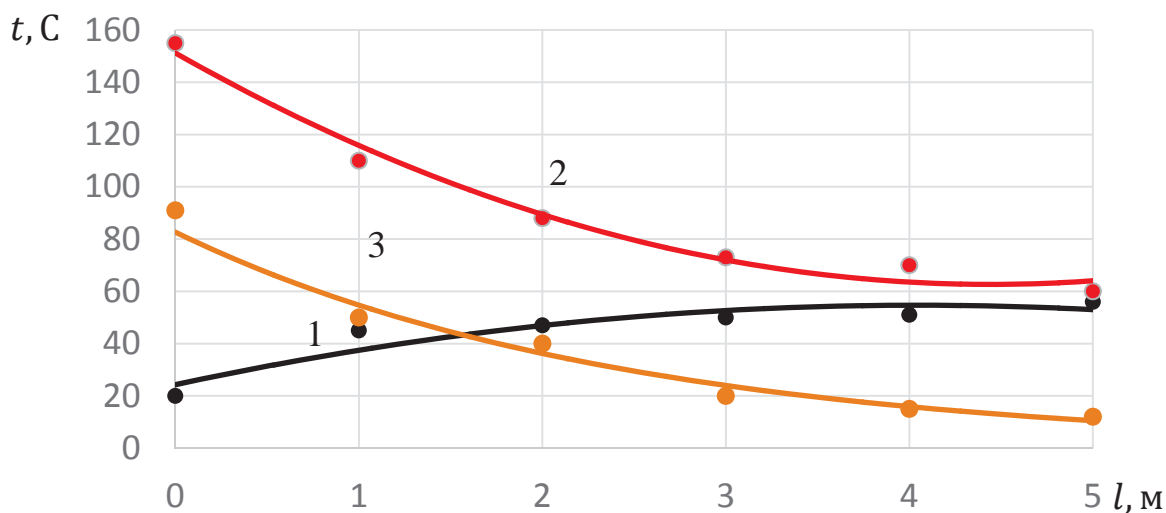


Рисунок 2 – Схема імітаційної моделі сушіння в барабанній сушарці в комп'ютерній середовищі *MatLab Simulink*

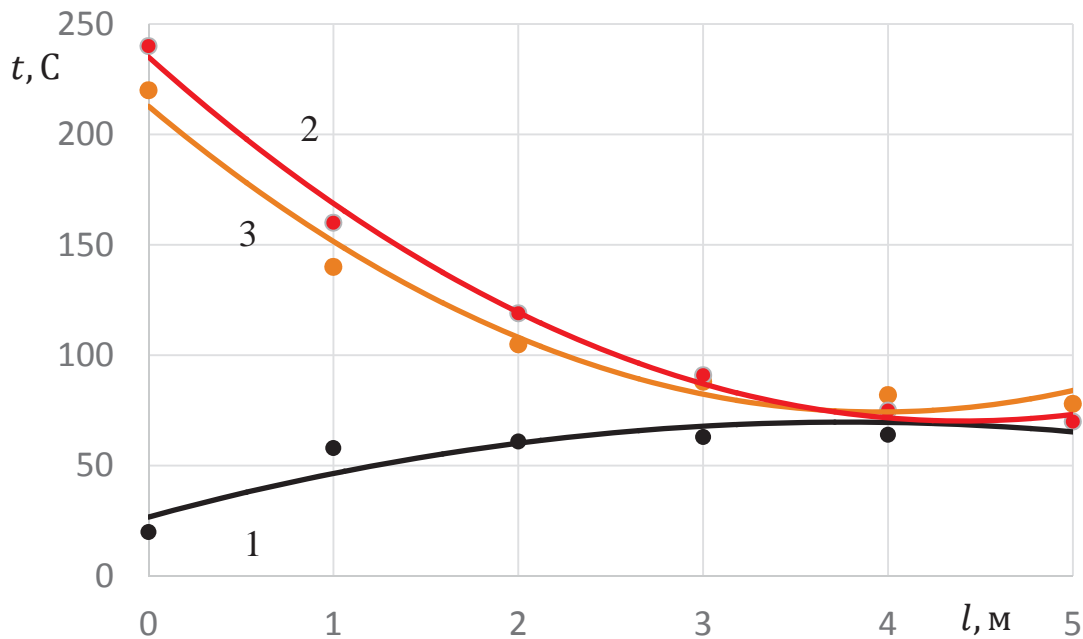
Джерело: розроблено авторами



1 - θ ; 2 - t ; 3 - U .

Рисунок 3 – Розподіл параметрів зерна і сушильного агента за довжиною барабана зерносушарки СЗПБ-2

Джерело: розроблено авторами



1 - θ ; 2 - t; 3 - U.

Рисунок 4 – Зміна параметрів процесу сушіння зерна за довжиною в барабані зерносушарки СЗПБ-2

Джерело: розроблено авторами

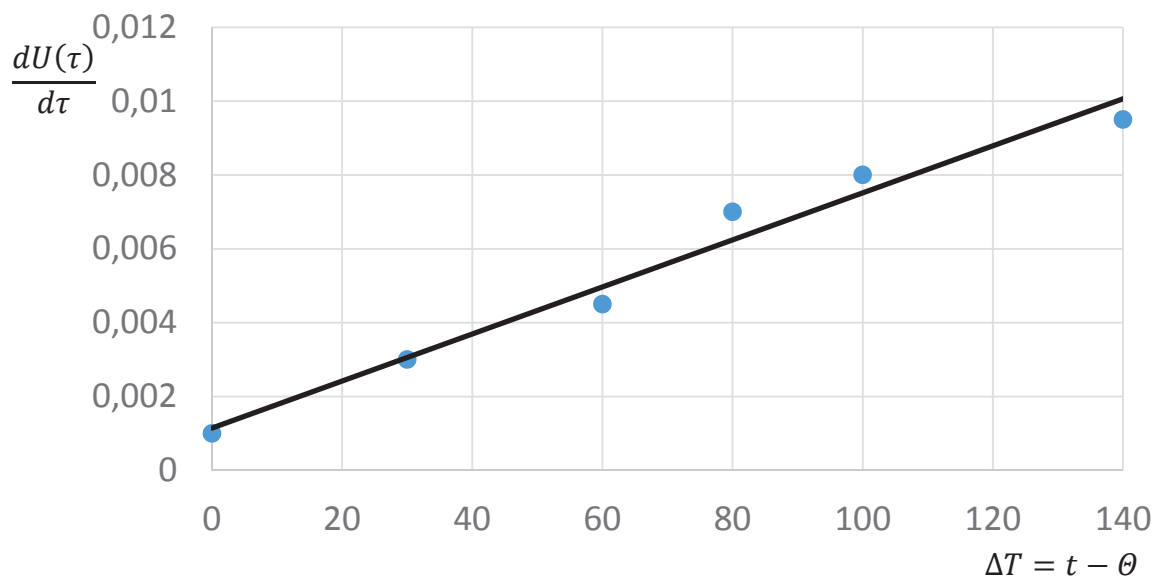


Рисунок 5 – Залежність швидкості зневоднення зерна (в барабані сушарки СЗПБ-2) від різниці температур сушильного агента і зерна

Джерело: розроблено авторами

стативи і, застосовуючи перетворення Лапласа [15], отримано систему рівнянь (20–22) в операторній формі:

$$(T_1 p + 1)\Delta\theta(p) = k_1\Delta t_1(p) + k_2\Delta\theta_1(p) + k_3\Delta U(p) + k_4\Delta V_M(p) + k_5\Delta V_C(p) + k_6\Delta t(p) \quad (30)$$

$$(T_2 p + 1)\Delta t(p) = k_7 \Delta t_1(p) + k_8 \Delta \theta_1(p) + k_9 \Delta U_1(p) + k_{10} \Delta U(p) + k_{11} \Delta V_M(p) + k_{12} \Delta V_C(p) + k_{13} \Delta \theta(p) \quad (31)$$

$$(T_3 p + 1)\Delta U(p) = k_{14} \Delta t_1(p) + k_{15} \Delta \theta_1(p) + k_{16} \Delta \theta(p) + k_{17} \Delta V_M(p) + k_{18} \Delta V_C(p) + k_{19} \Delta t(p) \quad (32)$$

де $T_1 = \frac{c_M^* m_0 + c_b m_b}{\alpha F}$; $T_2 = \frac{c_C m_0}{\alpha F}$; $T_3 = \frac{r R_b m_0}{\alpha F}$;

$k_1 - k_{20}$ – коефіцієнти – сталі величини, які виражаються через коефіцієнти лінеаризації, та сталі величини статичної характеристики;

R_b – коефіцієнт Ребіндера.

З рівнянь (30–32) визначені передаточні функції основних динамічних ланок по каналах керування. За керовані параметри прийнято $\Delta U_2(p)$ і $\Delta \theta_2(p)$, а управляючими параметрами визначені: зміна витрат сушильного агента, визначає швидкість $\Delta V_C(p)$ та швидкість переміщення матеріалу вздовж барабана, яка залежить від швидкості сушильного агента $V_C(p)$ та частоти обертання барабана W_6 . Температура сушильного агента стабілізується на вході барабана $t_1 = t$ задане значення.

Передаточні функції динамічних ланок визначені за очевидними співвідношеннями [15–18]:

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \frac{\Delta \theta_1(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; W_3(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta u(p)} = \frac{k_3}{T_1 p + 1}; W_4(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta V_M(p)} = \frac{k_4}{T_1 p + 1}; \\ W_5(p) &= \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_5}{T_1 p + 1}; W_6(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_6}{T_1 p + 1}; \\ W_7(p) &= \frac{\Delta t(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{k_7}{T_2 p + 1}; W_{10}(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta u(p)} = \frac{k_{10}}{T_2 p + 1}; \\ W_{11}(p) &= \frac{\Delta t(p)}{\Delta V_M(p)} = \frac{k_{11}}{T_2 p + 1}; W_{12}(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_{12}}{T_2 p + 1}; \\ W_{14}(p) &= \frac{\Delta u(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{k_{14}}{T_3 p + 1}; W_{16}(p) = \frac{\Delta u(p)}{\Delta \theta(p)} = \frac{k_{16}}{T_3 p + 1}; \\ W_{17}(p) &= \frac{\Delta u(p)}{\Delta V_M(p)} = \frac{k_{17}}{T_3 p + 1}; W_{18}(p) = \frac{\Delta u(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_{18}}{T_3 p + 1}; \\ W_{19}(p) &= \frac{\Delta u(p)}{\Delta t(p)} = \frac{k_{19}}{T_3 p + 1}; \end{aligned}$$

Рівняння динаміки теплогенератора для сушильного барабана на основі теплового балансу визначено [17–21] у вигляді

$$(T_4 p + 1)\Delta t_1(p) = k_{19} \Delta G_n + k_{20} \Delta G_c(v_2) \quad (33)$$

де G_n – витрати палива;

$\Delta G_c = S_6 \Delta V_C S_c$ – витрати сушильного агента;

S_6 – поперечний перетин барабана;

V_C – швидкість сушильного агента;

На основі рівнянь (30–32) та визначених передаточних функцій складена структурна схема лінійної моделі (рис. 6.)

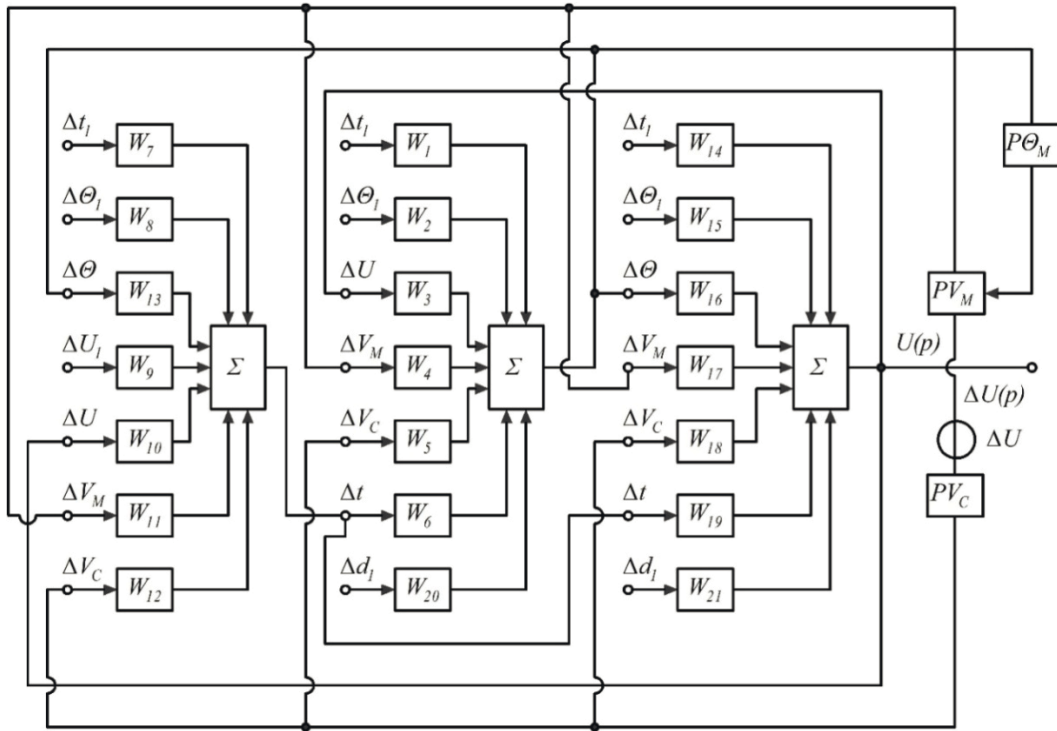


Рисунок 6 – Структурна схема лінійної моделі процесу сушки в барабані з контуром керування
Джерело: розроблено авторами

На основі аналізу структурної моделі визначено напрямки автоматизації процесу керування режимом сушки за алгоритмом реалізації [19–22]: температура сушильного агента стабілізується на заданому рівні t_1 та розроблена структурно-логічна схема об'єкта керування рис. 7.

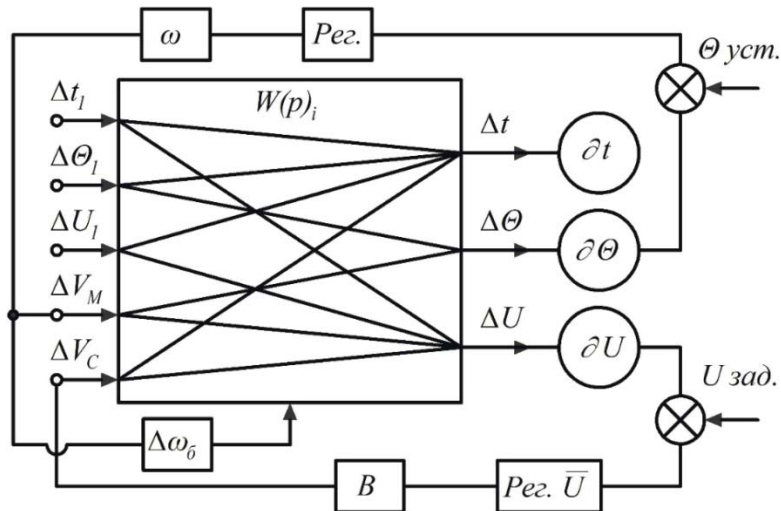


Рисунок 7 – Структурно-логічна схема об'єкта керування
Джерело: розроблено авторами

Вологість матеріалу на виході барабана регулюється зміною подачі сушильного агента в барабан $G_c(v_2)$.

Температура матеріалу на виході барабана регулюється швидкістю переміщення матеріалу в барабані, тобто кількістю матеріалу в барабані. Швидкість переміщення матеріалу в барабані регулюється зміною частоти обертання барабана. Тобто пропонується принцип кількісного (кількість теплоти) регулювання процесу сушки.

Висновки. Сформульований математичний опис, як системи нелінійних диференціальних рівнянь, в частинних похідних, визначає нестаціонарний температурно-вологісний режим сушіння матеріалу в барабанних сушарках і дозволяє визначити температуру і вологість матеріалу в залежності від параметрів сушильного агента і матеріалу з урахуванням конструктивних параметрів барабана.

1. Для використання прикладних комп'ютерних середовищ *MathCad* або *MatLab* для дослідження динаміки барабанної сушарки з урахуванням розподілу параметрів процесу за довжиною барабана сформульовані спрощені математичні моделі, реалізовані в середовищі *MatlabSimulink* та у вигляді лінійної структурної моделі, яка характеризує перехресні зв'язки параметрів матеріалу $\theta(y, \tau)$ і $u(y, \tau)$.

2. При синтезі САК для підвищення якості регулювання слід застосовувати методи компенсації перехресних зв'язків. Запропонована концептуальна модель керування процесом сушіння в обертальному барабані.

Список літератури

1. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Енергоефективні режими роботи машин для високоєфективної термообробки зернових матеріалів. Ніжин : Вид. центр НДУ ім. Гоголя, 2017. 261 с.
2. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) : монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин : ПП Лисенко, 2017. 551 с.
3. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Вінниця : ВНТУ, 2007. 76 с.
4. Котов Б. І. Технологічні та теплоенергетичні основи підвищення ефективності сушіння рослинної сировини : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Глеваха, 1994. 40 с.
5. Калініченко Р. А., Котов Б. І., Спірін А. В. Математична модель сушіння рослинної сировини в обертальному барабані за комбінованого підведення енергії. *Науковий вісник НУБіП України. Серія. Техніка та енергетика АПК*. 2017. Т. 261. С. 217–225.
6. Незведська І. В. Теоретичні передумови визначення залежності технологічних параметрів процесу сушіння від конструктивних параметрів сушильного барабана. *Науковий вісник НУБіП України*. 2012. № 170 (2). С. 95–101.
7. Гірник М. Л., Мазяк З. Ю., Гербей В. М. Математичне моделювання процесів конвективного сушіння. Київ : Будівельник, 1993. 248 с.
8. Активне вентилування та сушіння зерна : навч. посіб. / О. І. Гапонюк та ін. Одеса : ВНВ, 2014. 326 с.
9. Diduh V., Kirchuk R., Tsiz T. Modeling of energy saving methods of soybean drying for oil production. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2015. Vol. 15, no. 3. P. 9–14
10. Simulation of the grain drying process in bunker dryers using heliocollectors / B. Kotov et al. *Energy and automation*. 2022. Vol. 2022, no. 3. URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.03.038>
11. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Спірін А. В. Математичне моделювання процесу сушіння рослинних матеріалів в барабанній сушарці при змінній швидкості переміщення матеріалу. *Інженерія природокористування*. 2017. № 2(8). С. 19–23.
12. Котов Б. І., Степаненко С. П., Швидя В. О. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних режимів сушарок сільськогосподарських матеріалів. *Сільськогосподарські машини*. 2016. № 34. С. 74–80.
13. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Ліпунов М. І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. № 42 (2). С. 17–23.
14. Возняк О. М., Бабин І. А. Автоматизована система сушки жому цукрового виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 65–76.
15. Остапенко Ю. А. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування : підручник. Київ : Задруга, 1999.
16. Influence of vacuum on diffusion of moisture inside seeds of cereals / V. O. Shvidia et al. *Bulletin of the Karaganda University. "Physics" Series*. 2022. Vol. 107, no. 3. P. 90–98. URL: <https://doi.org/10.31489/2022ph3/90-98>
17. Теоретичні дослідження процесу охолодження зернового матеріалу при переміщенні у вібровідцентровому шарі / Б. І. Котов та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. № 46. С. 54–60.

18. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I. L. Rogovskii et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. P. 082057. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057>
19. Kaletnik H. The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd elektrotechniczny*. 2024. Vol. 1, no. 3. P. 234–239. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>
20. Математичне моделювання процесу охолодження зерна в установках з радіальною подачею повітря / Б. Котов та ін. *Bulletin of Lviv National Environmental University Agroengineering Research*. 2024. № 27. С. 101–107. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101> (дата звернення: 05.12.2024).
21. Kotov B., Bandura V. Construction of a mathematical model of extraction process in the system "solid body – liquid" in a microwave field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 6 (95). P. 33–43. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145232>
22. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes / O. Burdo et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4, no. 11 (88). P. 34–42. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>

References

1. Kalinichenko, R. A., & Voitiuk, V. D. (2017). *Energy-efficient operating modes of machines for highly efficient heat treatment of grain materials*. Publishing Center of the Gogol National University [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., & Lisetskyi, V. O. (2017). *Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)*. PP Lysenko [in Ukrainian].
3. Tkachenko, S. Y., & Spivak, O. Yu. (2007). Drying processes and installations. *VNTU* [in Ukrainian].
4. Kotov, B. I. (1994). Technological and heat-energy foundations for increasing the efficiency of drying plant raw materials []. dys. ... d. tekhn. n]. [in Ukrainian].
5. Kalinichenko, R. A., Kotov, B. I., & Spirin, A. V. (2017). Mathematical model of drying of plant raw materials in a rotating drum with combined energy supply. *Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine. Series. Engineering and Energy of the Agricultural Complex*, 261, 217–225 [in Ukrainian].
6. Nezvedska, I. V. (2012). Theoretical prerequisites for determining the dependence of technological parameters of the drying process on the design parameters of the drying drum. *Scientific Bulletin of the NUBiP of Ukraine*, (170 (2)), 95–101 [in Ukrainian].
7. Hirnyk, M. L., Maziak, Z. Yu., & Herbei, V. M. (1993). *Matematychni modeliuvannia protsesiv konvektivnoho sushinnia*. Budivelnik [in Ukrainian].
8. Haponiuk, O. I., Ostapchuk, M., Stankevych, H. M., & Haponiuk, I. I. (2014) Active ventilation and drying of grain. *VNV* [in Ukrainian].
9. Diduh, V., Kirchuk, R., & Tsiz, T. (2015). Modeling of energy saving methods of soybean drying for oil production. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 15(3), 9–14.
10. Kotov, B., Kalinichenko, R., Stepanenko, S., Hryshchenko, V., Pantsyr, Y., & Herasymchuk, I. (2022). Simulation of the grain drying process in bunker dryers using heliocollectors. *Energy and automation*, 2022(3). <https://doi.org/10.31548/energiya2022.03.038>
11. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., & Spirin, A. V. (2017). Mathematical modeling of the drying process of plant materials in a drum dryer at variable material movement speed. *Environmental Engineering*, (2(8)), 19–23 [in Ukrainian].
12. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Shvydia, V. O. (2016). Taking into account the distribution of parameters when modeling the dynamic modes of agricultural material dryers. *Agricultural machines*, (34), 74–80 [in Ukrainian].
13. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., & Lipunov, M. I. (2012). Analytical determination of dynamic thermal and moisture regimes of continuous grain dryers. *Design, production and operation of agricultural machines*, (42 (2)), 17–23 [in Ukrainian].
14. Vozniak, O. M., & Babyn, I. A. (2022). Automated system for drying sugar pulp. *Machinery, energy, transport, agro-industrial complex*, (1 (116)), 65–76 [in Ukrainian].
15. Ostapenko, Yu. A. (1999). Identification and modeling of technological control objects. *Zadruha* [in Ukrainian].
16. Shvydia, V. O., Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., Spirin, A. V., & Kucheruk, V. Y. (2022). Influence of vacuum on diffusion of moisture inside seeds of cereals. *Bulletin of the Karaganda University. "Physics" Series*, 107(3), 90–98. <https://doi.org/10.31489/2022ph3/90-98>

17. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kurhanskyi, O. D., Stepanenko, S. P., & Shvydia, V. O. (2016). Theoretical studies of the process of cooling grain material during movement in a vibro-centrifugal bed. *Design, production and operation of agricultural machinery*, (46), 54–60 [in Ukrainian].
18. Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Novitskii, A. V., & Rebenko, V. I. (2020). The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 548, 082057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057>
19. Kaletnik, H. (2024). The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd elektrotechniczny*, 1(3), 234–239. <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>
20. Kotov, B., Kalinichenko, R., Stepanenko, S., & Pansyr, Yu. (2024). Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University Agroengineering Research*, (27), 101–107. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>
21. Kotov, B., & Bandura, V. (2018). Construction of a mathematical model of extraction process in the system "solid body – liquid" in a microwave field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6 (95)), 33–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145232>
22. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., & Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11 (88)), 34–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>

Borys Kotov, Prof., DSc.

Institute of Higher Education "Podilsky State University", Hlevakha, Ukraine

Valentyn Mironenko, Prof., DSc., **Serhii Stepanenko**, DSc., Senior Researcher

Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine

Volodymyr Gryshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Yurii Pansyr, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Gerasimchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Institute of Higher Education "Podilsky State University", Hlevakha, Ukraine

Mathematical Modeling of the Material Drying Process in a Drum Dryer as an Object of Automatic Control

The aim of this research is to develop a mathematical description of the material drying process in drum dryers, create simplified models for analyzing the dynamics of this process, and formulate a conceptual model for automatic control of drying equipment to improve its efficiency.

The study proposes a mathematical description of the drying process in the form of a system of nonlinear partial differential equations, modeling the unsteady temperature-moisture regime of the material. Simplified models were developed for dynamic process analysis, implemented in MathCad and Matlab Simulink environments, taking into account the parameter distribution along the drum's length. These models describe the interrelation of key process parameters, such as $\Theta(y, \tau)$ and $u(y, \tau)$, which characterize cross-link effects. Additionally, a conceptual model for automatic control was developed, based on methods for compensating for parameter interdependencies.

The developed mathematical description of the drying process in drum dryers allows for an accurate assessment of the temperature-humidity regime of the material, which is important for optimizing the drying technology. The use of simplified models in the MathCad and Matlab Simulink software environments makes it possible to implement numerical simulation of the process dynamics, which includes the distribution of parameters along the length of the drum. This allows determining the optimal operating conditions of the dryer to ensure high quality of the processed material and reduce energy costs. The proposed automatic control concept, which is based on cross-coupling compensation methods, provides increased efficiency of the drying process regulation, stability of the dryer operation and a significant reduction in energy costs. The implementation of this concept will significantly improve the quality of material processing and increase the energy efficiency of drying processes, while reducing operating costs.

drying process, modeling, grain materials, drum dryer, automatic control

Одержано (Received) 26.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024