

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА В БУНКЕРНИХ
СУШАРКАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ**

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

ЗВО «Подільський державний університет»

Р. А. Калініченко, кандидат технічних наук, доцент

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

***С. П. Степаненко, доктор технічних наук, завідувач відділу перспективних
технологій і технічних засобів для збирання, обробки та зберігання врожаю
зернових і олійних культур***

ННЦ «Інститут механізації і електрифікації сільського господарства»

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Ю. І. Панцир, кандидат технічних наук, доцент

І. Д. Герасимчук, кандидат технічних наук, доцент

ЗВО «Подільський державний університет»

E-mail: rkalinichenko@ukr.net

Анотація. Сушіння є основним методом підготовки сільськогосподарських матеріалів до зберігання. Нині в світі існують різноманітні сушильні установки, в яких використовують енергію сонячної радіації для нагрівання сушильного агента або матеріалу, що висушують. Але більшість конструкцій сонячних сушарок пристосована для роботи в стаціонарних умовах, спеціальних приміщеннях або стаціонарного укриття. Зменшення енерговитрат на сушіння зернових матеріалів – актуальна проблема, яка вирішується двома основними шляхами – технічною модернізацією наявного сушильного обладнання і розробкою нових енергозберігаючих прийомів і режимів сушіння сільськогосподарських матеріалів та їх реалізації на наявних і модернізованих у господарствах установках. І перший, і другий шлях вирішення проблеми енергозбереження ґрунтується на математичному описі процесів тепло- і масообміну.

Математична модель теплових режимів сушильного агрегата являє собою комплекс взаємопов'язаних моделей окремих її елементів із зовнішніми кінематичними параметрами (температура атмосферного повітря, інтенсивність сонячного випромінювання, тощо). Модель окремого елемента системи є системою диференціальних рівнянь в диференціальній формі, граничних і початкових умов, в яких відображені основні фізичні залежності досліджуваних процесів.

Метою проведених досліджень було формулювання математичної моделі на основі теорії тепло- і масообміну для визначення динаміки розвитку взаємопов'язаних нестационарних полів температури і вологовмісту матеріалу і сушильного агента – повітря.

Чисельна реалізація запропонованих математичних моделей в стандартному математичному пакеті дозволяє аналізувати продуктивність роботи обладнання, зокрема плівкових геліоколекторів, для конвективного сушіння дисперсних сільськогосподарських матеріалів у шарі залежно від параметрів матеріалу, що подається на сушіння, інтенсивності сонячного випромінювання або (і) потужності теплогенератора, добових коливань температури атмосферного повітря.

Ключові слова: *зерносушіння, сонячний колектор, бункерна установка, режими сушіння, сушильний агент*

Актуальність. Одним із ефективних напрямків зниження використання традиційних паливно-енергетичних ресурсів у галузях післязбиральної обробки зернопродукуючих господарств є використання поновлювальних джерел енергії і, в першу чергу, енергії сонячного випромінювання для сушіння зерна та інших сільгосппродуктів. Нині в світі існують різноманітні сушильні установки, в яких використовують енергію сонячної радіації для нагрівання сушильного агента або матеріалу, що висушують. Але більшість конструкцій сонячних сушарок пристосована для роботи в стаціонарних умовах, спеціальних приміщеннях або стаціонарного укриття.

Останнім часом господарства все частіше використовують пересувні зерносушарки [1, 2, 3], які можуть функціонувати ззовні капітальних споруд (зерносховищ, складів). Для зерносушарок такого типу можуть використовуватися переносні сонячні колектори плівкового типу [3].

Серед проаналізованих конструкцій зерносушарок найпоширенішими, простими в експлуатації і ефективними технологічно є зерносушарки бункерного типу з радіальним розподіленням сушильного агента [4,5]. Але дані щодо режимів (температурних) їх функціонування в декларованих матеріалах [1,2,3,4,5] відсутні. Для визначення ефективності застосування геліоколекторів для нагрівання сушильного агента і визначення технологічних параметрів всього сушильного агрегату, які забезпечують енергетичну і технологічну ефективність, необхідно

розробити математичну модель сушильного агрегату на базі бункерної сушарки і геліоколектора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання бункерних, у тому числі і пересувних зерносушарок має достатнє обґрунтування на рівні експертних оцінок [6,7]. Аналіз сучасних методів дослідження сушильних процесів і математичні моделі теплових процесів висвітлені в монографії [8]. Сушіння і щільному рухомому шарі має ту особливість, що зміна параметрів сушильного агента зерна відбувається як в часі, так і за координатою, на цій основі побудовано математичні моделі сушіння в перехресних потоках [9] для плоского рухомого шару зерна. У роботі [10] наведено математичну модель охолодження зерна після сушіння в бункері радіальним розподілом повітря. Особливість процесів тепломасообміну в бункерних установках полягає в тому, що швидкість фільтрованого газу змінюється за напрямом руху. У роботі [10] цей фактор не враховано. Математичні моделі геліоколекторів плівково-рукавного типу висвітлені в роботі [3]. Але теплові процеси в бункерних установках з геліонагрівачами зовнішнього повітря в розглянутих публікаціях не розглядалися.

Мета дослідження – формулювання математичного опису процесів сушіння в бункерній сушарці з використанням сонячного колектора для підготовки сушильного агента.

Матеріали і методи дослідження. Використовувався аналіз і синтез аналітичних математичних моделей теорії тепло-масопровідності, математико-статистичні методи теорії планування експерименту. Основою складання математичного опису є аналіз теплового і матеріального балансу матеріалу і сушильного агента – повітря, нагрітого в геліоколекторі або (і) теплогенераторі для нестационарного режиму. Для опису процесів у геліоколекторі використана спрощена схема.

Результати досліджень та їх обговорення. Розглянемо відоме обладнання для сушіння зерна і нагрівання атмосферного повітря: бункерна зерносушарка [5] і рухомий плівковий геліоколектор [3], теплогенератор для нагрівання сушильного агента, яке разом складає зерносушильний агрегат (рис.1).

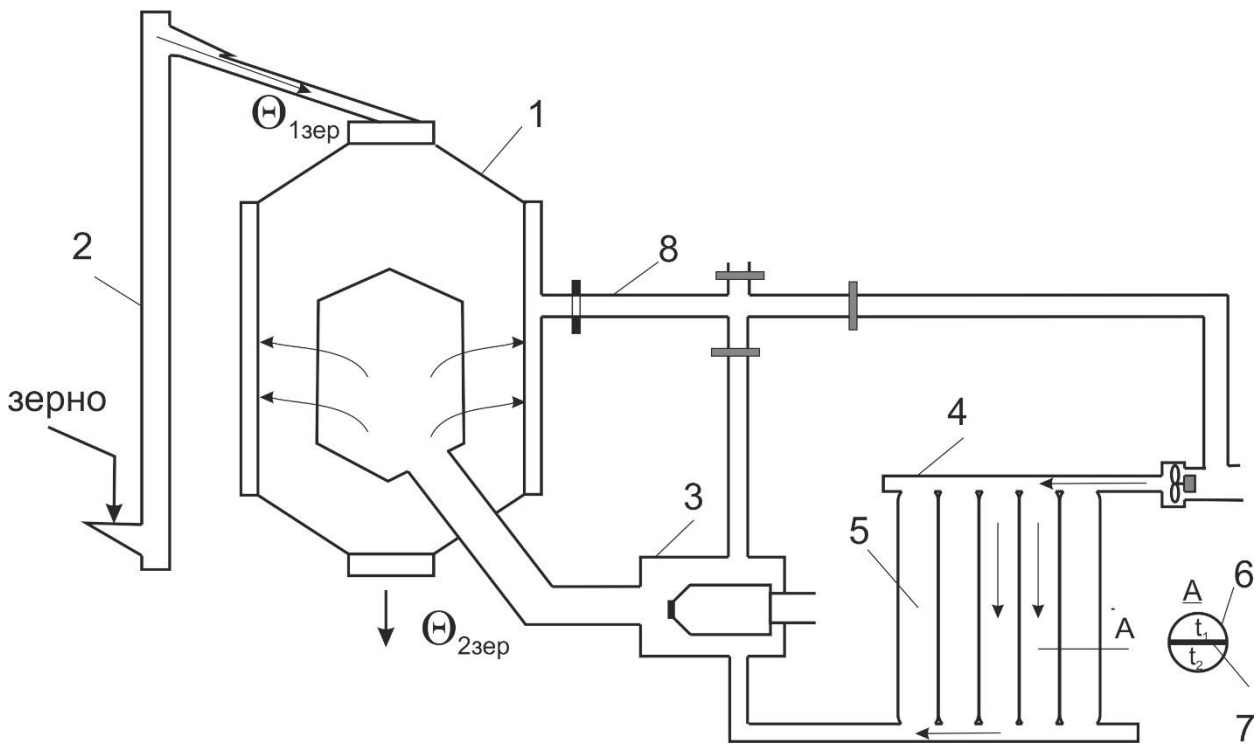


Рис.1. Схема сушильного агрегата:

1 – бункерна зерносушарка; 2 – норія завантаження; 3 – теплогенератор; 4 – сонячний колектор; 5 – нагрівний елемент; 6 – зовнішня прозора оболонка; 7 – поглинальна поверхня; 8 – контур рециркуляції

Математична модель теплових режимів сушильного агрегату є комплексом взаємопов'язаних моделей окремих її елементів із зовнішніми кінематичними параметрами (температура атмосферного повітря, інтенсивність сонячного випромінювання, тощо). Модель окремого елемента системи є системою диференціальних рівнянь у диференціальній формі, граничних і початкових умов, в яких відображені основні фізичні залежності досліджуваних процесів.

У зв'язку з тим, що режими роботи сушильного агрегата в більшості випадків нестационарні, доцільно розділити їх на дві основні групи: нестационарні (перехідні), характерні для режимів регулювання процесів, та квазістационарні, для яких можуть бути застосовані рівняння стаціонарних режимів при підстановці в них миттєвих значень параметрів.

Для сушильної установки характерним є стаціонарний режим функціонування, коли в кожній точці робочого простору сушильного об'єму зберігаються певні значення параметрів незалежно від часу. Для сонячного колектора характерний нестаціонарний режим, відповідно до зміни клімату.

Для складання системи диференціальних рівнянь тепло- і масопереносу (масообміну) в кінцевому рухомому шарі зерна прийемо таку постановку завдання. Через шар зерна, що рухається гравітаційно між двома перфорованими циліндрами радіуса r_0 (внутрішній циліндр) і R . Порозність шару зерна – ε . У радіальному напрямку фільтрується сушильний агент із постійною на вході температурою – t_1 . Потік зерна з початковою температурою θ_1 і вологовмістом U_1 рухається вертикально вниз. Необхідно визначити температуру та вологовміст зерна і сушильного агента на відстані r від місця подачі сушильного агента та відстані h від місця подачі зерна при таких загальноприйнятих припущеннях:

– теплофізичні властивості зерна і сушильного агента, а також величини обмінних коефіцієнтів не залежать від температури і вологості та дорівнюють середнім значенням за процес;

– нагрівання і зневоднення зерна безградієнтні;

– перенесенням теплоти в шарі зерна нехтуємо;

– втрати теплоти в навколишнє середовище становлять 5 % від теплоти на видалення вологи.

На основі аналізу складових теплового і матеріального балансу для елементарного об'єму зернового шару dV , розміщеного в шарі з координатами (радіусу – r і висоти – h) за час $d\tau$ складено систему диференціальних рівнянь із змінною швидкістю сушильного агента $V_c(r)$.

$$c_s(1-\varepsilon)\rho_s\left(\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+V_s\frac{\partial\theta}{\partial h}\right)-r^*(1-\varepsilon)\rho_0\left(\frac{\partial U}{\partial\tau}+V_s\frac{\partial U}{\partial h}\right)=\alpha f_v(t-\theta); \quad (1)$$

$$c_c\rho_c\varepsilon\left(\frac{\partial t}{\partial\tau}+V_c(r)\frac{\partial t}{\partial r}\right)=\alpha f_v(\theta-t); \quad V_c(r)=\frac{V_0\cdot r_0}{r} \quad (2)$$

$$(1-\varepsilon)\rho_0\left(\frac{\partial U}{\partial\tau}+V_s\frac{\partial U}{\partial h}\right)=\rho_c\varepsilon\left(\frac{\partial d}{\partial\tau}+V_c(r)\frac{\partial d}{\partial r}\right); \quad (3)$$

$$\varepsilon \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + V_c(r) \frac{\partial d}{\partial r} \right) = \beta f_c (d''(\theta) - d); \quad (4)$$

$$-\left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + V_s \frac{\partial U}{\partial h} \right) = k(\theta)(U - U_p), \quad k = \mu_1^2 \frac{a_m(\theta)}{R_0}; \quad (5)$$

де, θ , t – температура зерна і сушильного агента; U , d – вологовміст зерна і сушильного агента; ρ_z , ρ_c – густина зерна і сушильного агента; α , β , k – коефіцієнти теплообміну, масообміну, сушіння; r , h – поточний радіус і висота (координати); r^* – питома теплота пароутворення; a_m – коефіцієнт температуропровідності; R_0 – розмір елементарного об'єму; μ_1^2 – корінь характеристичного рівняння теплопровідності; V_0 – швидкість сушильного агента на вході в шар зерна; r_0 – товщина шару зерна.

Система рівнянь (1–5) описує нестационарний процес сушіння зерна в рухомому кільцевому шарі бункерних сушильних установок з радіальним розподілом сушильного агента, за таких граничних і початкових умов.

Граничні умови: $t(\tau, 0, r_0) = t_1$; $\theta(\tau, h, 0) = \theta_1$; $U(\tau, h, r_0) = U_1$; $d(\tau, 0, r_0) = d_1$. Рівноважна вологість: $U_p(d, t) = 37.2t^{-0.96}t_1$, $V(r_0) = V_0$, та початкові умови: $t(0, h, r_0) = t_0 = t_1$; $\theta(0, h, r_0) = \theta_0 = t_1$; $U(0, h, r_0) = U_0 = U_1$; $d(0, h, r_0) = d_0 = d_1$.

Коли розглядається конкретна сушильна установка з рухомим або нерухомим шаром зерна, конструктивні та технологічні параметри, що входять у модель відомі (висота і радіус бункера, товщина шару і швидкість переміщення зерна, витрати і швидкість сушильного агента), тому можна усереднити та виключити деякі параметри, а також спростити модель відповідно до задач моделювання.

За умови $V_s = 0$ рівняннями (1-5) описують процес сушіння зерна у нерухомому шарі зерна з радіальним розподілом сушильного агента (бункер активного вентилявання). За умов $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial d}{\partial \tau} = \frac{\partial U}{\partial \tau}$ зазначені рівняння визначають стаціонарний режим сушіння зерна.

Математичний опис нестационарного теплового процесу в геліоколекторі складається на основі теплового балансу елементів конструкції плівкового колектора.

Використовуючи загальний методичний прийом аналізу складових теплового балансу елементів геліоколектора, представимо нагрівальний елемент геліоколектора відповідно до схеми (рис.2) трьома теплоінерційними ємностями: поглинальна пластина (1), світлопрозора оболонка, що поділена на дві частини: верхня (2) і нижня (3). Теплосприймаюча пластина – адсорбер сприймає енергію сонячного випромінювання, яка передається в повітря у верхню і нижню частину каналу. Частина теплоти від повітряних потоків крізь плівкову зовнішню оболонку передається в навколишнє середовище (теплові втрати нагрівального елемента). Для формулювання диференціальних рівнянь теплового балансу зробимо такі спрощувальні припущення: швидкість повітря в каналах постійна; коефіцієнти теплообміну-теплопередачі не залежать від температури; поглинальна пластина і оболонка термічно «тонкі»; верхня частина оболонки поглинає частку випромінювання в кількості I_{AFa} . Теплові процеси за такою схемою при зроблених припущеннях можна описати такою системою диференціальних рівнянь:

$$I(\alpha\tau)F_p = m_p c_p \frac{\partial \theta_p}{\partial \tau} + k_1 F_p (\theta_p - t_1) + k_2 F_p (\theta_p + t_2) + F_p k_B (\theta_p - \theta_{01}) + F_p k_B (\theta_p - \theta_{02}); \quad (6)$$

$$k_1 (\theta_p - t_1) = m_n c_n \frac{\partial t_1}{\partial \tau} + G_{n1} c_n L \frac{\partial t_1}{\partial y} + k_3 F_{01} (t_1 - t_3) + I A F_{01}; \quad (7)$$

$$k_2 (\theta_p - t_2) = m_n c_n \frac{\partial t_2}{\partial \tau} + G_{n2} c_n L \frac{\partial t_2}{\partial y} + k_4 F_{02} (t_2 - t_3); \quad (8)$$

де I – інтенсивність сонячного випромінювання; θ_p , θ_{01} , θ_{02} – температури оболонок; t_1 , t_2 – температури повітря; F_p , F_{01} , F_{02} – поверхні адсорбера і оболонок; m_p , m_n – маси оболонок, поглинальної і захисної; c_p , c_n – питома теплоємність матеріалу оболонок; L – довжина нагрівального елемента; G_{n1} , G_{n2} – масові витрати повітря у відповідних каналах; τ – час; y – координата; k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – коефіцієнти теплопередачі (конвекцією, випромінюванням) визначаються відповідно за [].

Граничні і початкові умови: $y=0$, $t_1=t_2=t_3$; $\tau=0$, $\theta_p=\theta_{01}=\theta_{02}=t_3$, $t_1=t_2=\theta_p=\theta_{01}=\theta_{02}=t_3$, де t_3 – температура зовнішнього повітря, $t_3 = A_1 \sin(\omega\tau)$.

Температура на виході колектора:

$$t_k = \frac{t_1 G_1 + t_2 G_2}{G}; \quad (9)$$

де $G = G_1 + G_2$ – продуктивність вентилятора.

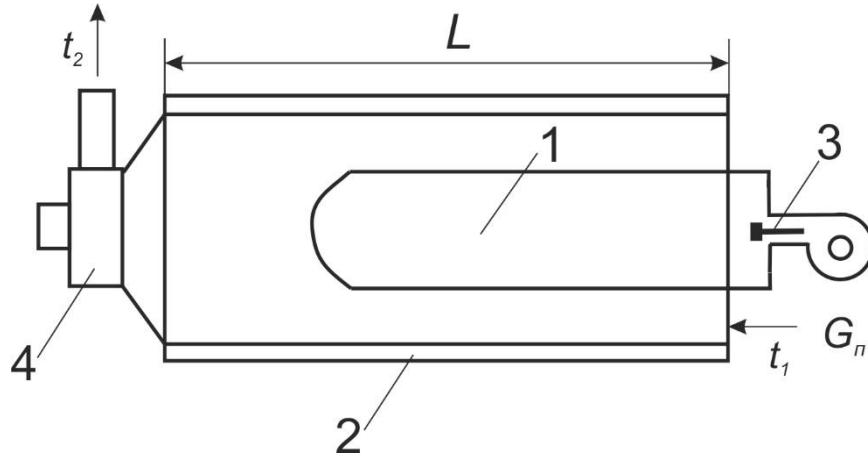


Рис.2. Схема теплогенератора:

1– камера згоряння; 2 – корпус (зовнішня стінка); 3 – пальник; 4 – вентилятор подачі сушильного агента

Математична модель теплових процесів теплогенератора складається з рівнянь теплового балансу для трьох теплоінерційних елементів: пальника, камери згорання палива та потоку сушильного агента:

$$Q = \frac{\alpha_m f_m}{L} (\theta_m - t); \quad (10)$$

$$\frac{\alpha_m f_m}{L} (\theta_m - t) = cm \frac{\partial t}{\partial t} + cGL \frac{\partial t}{\partial x} + \alpha_c f_c (t - \theta_c); \quad (11)$$

$$\alpha_c f_c (t - \theta_c) = c_c m_c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha_3 f_3 (\theta_c - t_3); \quad (12)$$

де t , θ_m , θ_c , t_3 – температури повітря, камери згоряння, стінки та зовнішнього повітря; α_m , α_c , α_3 – коефіцієнти тепловіддачі до повітря від камери згорання, стінок внутрішньої і зовнішньої; f_m , f_c – питома поверхня камери згоряння та стінки; c , c_c – питома теплоємність сушильного агента та стінки; G – витрати сушильного агента; m , m_c – маса сушильного агента в об'ємі теплогенератора та стінки.

Початкові і граничні умови: $\tau=0$, $t=\theta=t_3$; $x=0$, $t=t_1$.

Таким чином, системи рівнянь (1-5), (6-8) та (10-12) складають математичну модель нестационарного режиму сушильного агрегату при такому рівнянні зв'язку:

$$t = (G_k t_{\text{вихк}} + G_{\text{вихт}} t) \frac{1}{G_k + G_T}; \quad (13)$$

де G_k, G_T – витрати повітря в сонячному колекторі та теплогенераторі; $t_{вих_к}, t_{вих_Т}$ – вихідна температура колектора та теплогенератора.

Графічна інтерпретація чисельного розрахунку за моделлю (1)-(8) в середовищі Mathematica представлена на рис.3.

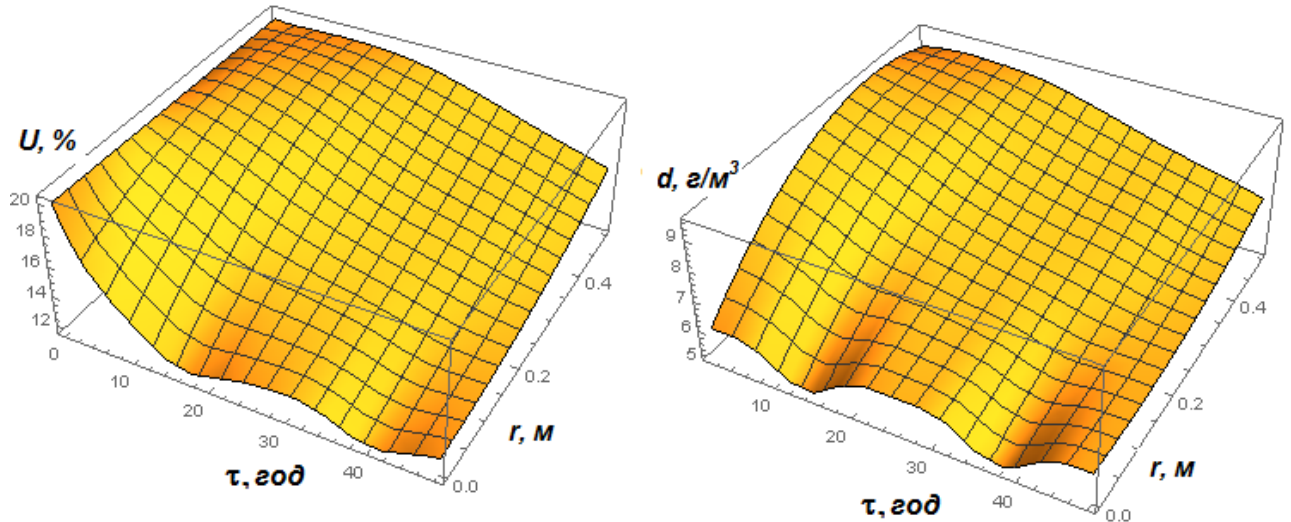


Рис.3. Зміна вологості зерна і вологовмісту сушильного агенту за радіусом бункера активного вентилявання

Висновки та перспективи. Розроблені математичні моделі дозволяють прораховувати процес сушіння зернової сировини в бункерах з радіальним повітрярозподіленням сушильного агенту і добовій зміні його параметрів. Чисельна, сумісна реалізація запропонованих математичних моделей дозволяє обґрунтовувати енергоефективні режими сушіння і досушування зернової сировини, з використанням плівкових геліоколекторів.

Список використаних джерел

1. Михайлов Є.В. Післязбиральна обробка зерна у господарствах півдня України: монографія. Мелітополь: Люкс. 2012. 260 с.
2. Машины, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур: за ред. В. І. Кравчука. Держ. наук. установа "Укр. НДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва ім. Леоніда Погорілого". Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2011. 224 с.
3. Котов Б. І. Математичне моделювання нагрівання повітря в геліоколекторах для сушіння рослинної сировини. Електрифікація і автоматизація сільського господарства. 2002. №1. С.107-109.

4. Мобільні зерносушарки Agrimes (Італія). Прайс-проспект товариства Ерідон Тех. 2022.

5. Паспорт. Сушарка бункерна циркуляційна марки СБЦ. Керівництво по експлуатації. Чернігів: НВТ-технологія, 2013. 20 с.

6. Кирпа Н. Я. Теплові технології і перспективи енергозбереження в зерновому господарстві. Сучасні енергоощадні теплові технології (сушіння і тепловологісна обробка матеріалів) СЕТТ-2008. Праці конференції. Т.1. С. 381-387.

7. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Енергоєфективні режими роботи машин для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів: монографія. Ніжин: Видавничий центр НДУ ім. М.В. Гоголя, 2017. 261с.

8. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження): монографія Ніжин: ПП Лисенко М.М., 2017. 552 с.

9. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Спирін А. В. Моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в безперевних сушарках колонкового типу. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2016. № 6. С. 69-75.

10. Матківська І. Я., Атаманюк В. М., Барна І. Р. Кінетика сушіння зерна пшениці фільтраційним методом. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2014. № 17. С. 130-138

Referenses

1. Mykhaylov, YE. V. (2012). Pislyazbyral'na obrobka zerna u gospodarstvakh pivdnya Ukrayiny: monohrafiya [Postharvest processing of grain in farms of the south of Ukraine]. Melitopol': Lyuks, 260.

2. Kravchuk, V. I. (2011). Mashyny, ahrehaty ta komplekxy dlya pislyazbyral'noyi obrobky i zberihannya zernovykh kul'tur : posibnyk [Machines, units and complexes for post-harvest processing and storage of cereals: a manual]. Derzh. nauk. ustanova "Ukr. NDI prohnozuvannya ta vyprobuvannya tekhniky i tekhnolohiy dlya s.-h. vyrobnytstva im. Leonida Pohoriloho". Doslidnyts'ke: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho, 224.

3. Kotov, B. I. (2002). Matematyчне modelyuvannya nahrivannya povitrya v heliokolektorakh dlya sushynnya roslynnoyi syrovyny [Mathematical modeling of air heating in solar collectors for drying vegetable raw materials]. Elektryfikatsiya i avtomatyzatsiya sil's'koho gospodarstva, 1, 107-109.

4. Mobil'ni zernosusharky Agrimec (Italiya) [Mobile grain dryers Agrimec (Italy)] (2022). Prays-prospekt tovarystva Eridon TeKH.

5. Pasport. Susharka bunkerna tsyrkulyatsiyна marky SBTS. Kerivnytstvo po ekspluatatsiyi. [Passport. Dryer bunker circulating brand SBC. Operation manual] (2013). Chernihiv: NVT-tekhnohohiya, 20.

6. Kyrpa, N.YA. (2008). Teplovi tekhnolohiyi i perspektyvy enerhozberezhennya v zernovomu gospodarstvi [Thermal technologies and prospects of energy saving in grain economy]/ Suchasni enerhooshchadni teplovi tekhnolohiyi (sushynnya i tepvolohisna obrobka materialiv) SETT-2008. Pratsi konferentsiyi, 1, 381-387.

7. Kalinichenko, R. A., Voytyuk, V. D. (2017). Enerhoefektyvni rezhymy roboty mashyn dlya vysokointensyvnoyi termoobrobky zernovykh materialiv: monohrafiya

[Energy efficient modes of operation of machines for high-intensity heat treatment of grain materials]. Nizhyn: Vydavnychyuy tsentr NDU im. M.V. Hoholya, 261.

8. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepaneko, S. P., Shvydya, V. O., Lisets'kyu V. O. (2017). Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'yektakh pislyazbyral'noyi obrobky i zberihannya zerna (separatsiya, sushinnya, aktyvne ventylyuvannya, okholodzhennya) [Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]. Nizhyn: Vydavets PP Lysenko M. M, 552.

9. Kotov B. I., Kalinichenko R. A., Spirin A. V. (2016). Modelyuvannya rezhymiv sushinnya dyspersnykh materialiv v bezperevnykh susharkakh kolonkovoho typu [Modeling of drying modes of dispersed materials in continuous dryers of column type]. Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv, 6, 69-75.

10. Matkivs'ka, I. YA, Atamanyuk, V. M., Barna, I. R.(2014) Kinytyka sushinnya zerna pshenytsi fil'tratsiynym metodom [Kinetics of wheat grain drying by filtration method]. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh, 17, 130-138.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШЕНИЯ ЗЕРНА В БУНКЕРНЫХ СУШАРКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРОВ

***Б. И. Котов, Р. А. Калиниченко, С. П. Степаненко, В. А. Грищенко,
Ю. И. Панцыр, И. Д. Гарасимчук***

Аннотация. Сушка является основным методом подготовки сельскохозяйственных материалов к хранению. В настоящее время в мире существуют разнообразные сушильные установки, в которых используют энергию солнечной радиации для нагрева сушильного агента или высушиваемого материала. Но большинство конструкций солнечных сушилок приспособлены для работы в стационарных условиях, специальных помещениях. Уменьшение энергозатрат на сушку зерновых материалов – актуальная проблема, которая решается двумя основными путями – технической модернизацией существующего сушильного оборудования и разработкой новых энергосберегающих приемов и режимов сушки сельскохозяйственных материалов и их реализации на имеющихся и модернизированных в хозяйствах установках. И первый, и второй путь решения проблемы энергосбережения основывается на математическом описании процессов тепло- и массообмена.

Математическая модель тепловых режимов сушильного агрегата представляет собой комплекс взаимосвязанных моделей отдельных ее элементов с внешними кинематическими параметрами (температура атмосферного воздуха, интенсивность солнечного излучения и т.п.). Модель отдельного элемента системы представляет собой систему дифференциальных уравнений в дифференциальной форме, предельных и начальных условий, в которых отражены основные физические зависимости изучаемых процессов.

Целью проведенных исследований была формулировка математической модели на основе теории тепло- и массообмена для определения динамики развития

взаимосвязанных нестационарных полей температуры и влагосодержания материала и сушильного агента – воздуха.

Численная реализация предложенных математических моделей в стандартном математическом пакете позволяет анализировать производительность работы оборудования, в частности пленочных гелиоколлекторов, для конвективной сушки дисперсных сельскохозяйственных материалов в слое в зависимости от параметров подаваемого на сушку материала, интенсивности солнечного излучения или (*и*) мощности теплогенератора, суточных колебаний температуры атмосферного воздуха.

Ключевые слова: зерносушилка, солнечный коллектор, бункерная установка, режимы сушки, сушильный агент

SIMULATION OF THE GRAIN DRYING PROCESS IN BUNKER DRYERS USING HELIOPANELS

B. Kotov, R. Kalinichenko, S. Stepanenko, V. Grishchenko, Yu. Pantsyr, I. Garasimchuk

Abstract. *Drying is the main method of preparing agricultural materials for storage. Today, there are a variety of drying plants in the world that use solar radiation energy to heat a drying agent or drying material. But most designs of solar dryers are adapted to work in stationary conditions, special rooms. Reducing energy consumption for drying grain materials is an urgent problem, which is solved in two main ways - technical modernization of existing drying equipment and development of new energy-saving methods and modes of drying agricultural materials and their implementation on existing and upgraded facilities. Both the first and second way of solving the problem of energy saving is based on a mathematical description of the processes of heat and mass transfer.*

The mathematical model of thermal modes of the drying unit is a set of interconnected models of its individual elements with external kinematic parameters (atmospheric air temperature, intensity of solar radiation, etc.). The model of a single element of the system is a system of differential equations in differential form, limit and initial conditions, which reflect the basic physical dependences of the studied processes.

The aim of the research was to formulate a mathematical model based on the theory of heat and mass transfer to determine the dynamics of the development of interconnected nonstationary fields of temperature and moisture content of the material and the drying agent - air.

Numerical implementation of the proposed mathematical models in a standard mathematical package allows to analyze the performance of equipment, in particular film solar collectors, for convective drying of dispersed agricultural materials in the layer depending on the parameters of the feed material, solar radiation intensity or (and) heat generator capacity atmospheric air.

Key words: *grain dryer, solar collector, bunker installation, drying modes, drying agent*