

УДК 631.365.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.114-121>

В.О. Швидя, канд. техн. наук, **С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Україна
e-mail: Shvidia@gmail.com, e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання процесу роботи сушильної камери баштової зерносушарки зі всмоктувальним повітряним потоком

У статті розроблено схему сушіння в баштовій зерносушарці, складені рівняння збереження енергії та матеріального балансу для зерна, рівняння масообміну й теплообміну між сушильним агентом та зерном. На їхній основі одержано аналітичні залежності зміни температури та вологості зерна, вологовмісту та температури сушильного агента вздовж і вишир сушильного каналу залежно від режимних параметрів (величини розрідження в сушильному каналі, швидкості руху зерна вздовж сушильного каналу, швидкості руху сушильного агента, початкових температур зерна та сушильного агента, початкової вологості зерна, а також початкового вологовмісту сушильного агента). Їх аналіз полегшує роботу у виборі раціонального режиму.

Розроблені аналітичні залежності зміни основних параметрів сушіння (вологість та температура зерна, вологовміст та температура сушильного агента) по довжині та ширині сушильного каналу в баштових сушарках зі всмоктувальним повітряним потоком дають можливість зв'язати основні режимні параметри, що полегшує вибір раціональних режимів сушіння.

зерно, сушильний агент, баштова зерносушарка, сушильний канал, всмоктувальний повітряний потік, розрідження, режимні параметри зерносушарки.

В. О. Швидя, канд. техн. наук, **С. П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», пгт Глеваха, Україна

Математическое моделирование процесса работы сушильной камеры башенной зерносушилки с всасывающим воздушным потоком

В статье разработана схема сушки в башенной зерносушилке, составлены уравнения сохранения энергии и материального баланса для зерна, уравнения массообмена и теплообмена между сушильным агентом и зерном. На их основе получены аналитические зависимости изменения температуры и влажности зерна, влагосодержания и температуры сушильного агента вдоль и виширь сушильного канала в зависимости от режимных параметров (величины разрежения в сушильном канале, скорости движения зерна вдоль сушильного канала, скорости движения сушильного агента, начальных температур зерна и сушильного агента, начальной влажности зерна, а также начального влагосодержания сушильного агента). Их анализ облегчает работу в выборе оптимального режима.

Разработанные аналитические зависимости изменения основных параметров сушки (влажность и температура зерна, влагосодержание и температура сушильного агента) по длине и ширине сушильного канала в башенных сушилках с всасывающим воздушным потоком дают возможность связать основные режимные параметры, что облегчает выбор рациональных режимов сушки.

зерно, сушильный агент, башенная зерносушилка, сушильный канал, всасывающий воздушный поток, разрежение, режимные параметры зерносушилки

Постановка проблеми. Технологічна операція сушіння є найбільш енерговитратною серед операцій післязбиральної обробки зерна. Вона дає можливість господарству забезпечити зберігання зібраного врожаю та покращити його якість. Для сушіння зерна в господарствах України переважно використовують шахтні, модульні, бункерні сушарки. Найбільшу якість й ефективність сушіння забезпечують шахтні сушарки. Оскільки в їхній конструкції використовуються повітророзподільні коробки, то це збільшує металомісткість конструкції, а отже, й вартість. Тому в ринкових умовах на заміну шахтним сушаркам приходять баштові. У них відсутні повітророзподільні коробки і сушильний агент надходить у зерновий шар із внутрішньої трубчасті частини до зовнішньої циліндричної, чи навпаки.

Використання всмоктувального повітряного потоку в баштових сушарках дає можливість підвищити їхню теплову ефективність та поліпшує екологічний стан навколо сушарки, оскільки всмоктування сприяє збиранню зернового пилу, що збільшує їхню конкурентоздатність на ринку. Для визначення раціональних режимів сушіння на даних сушарках необхідні надійні розрахункові формули, які визначають параметри сушіння за даними показників призначення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай у практиці конструювання зерносушарок [2–4, 11–14] розрахунок процесу сушіння зводиться до визначення експозиції сушіння для конкретного зерноматеріалу [3] з заданою продуктивністю, вхідними та вихідними параметрами сушарки витрат сушильного агента і витрат теплоти. Проте, випарна здатність сушарки не завжди збігається з випарною можливістю матеріалу. Але такі спрощені розрахунки не дають можливості аналізу та вибору найбільш придатних раціональних режимів сушіння. У дослідженнях [8–9] було розглянуто математичне моделювання шахтних сушарок. У науковій роботі [10] встановлено інтенсифікацію сушіння при використанні вакууму для сушіння насіння сільськогосподарських культур, також у роботі у загальній формі було обґрунтовано використання всмоктувального повітряного потоку [5, 11–14], але не описується його використання в конкретній конструкції сушарки.

Для практичного використання сушіння зі всмоктувальним повітряним потоком необхідна прив'язка до конкретної конструкції сушарки, що дасть можливість розрахувати необхідні параметри та порівняти з іншими технологіями.

Мета досліджень. Визначити аналітичні залежності зміни основних параметрів сушіння в баштових сушарках зі всмоктувальним повітряним потоком.

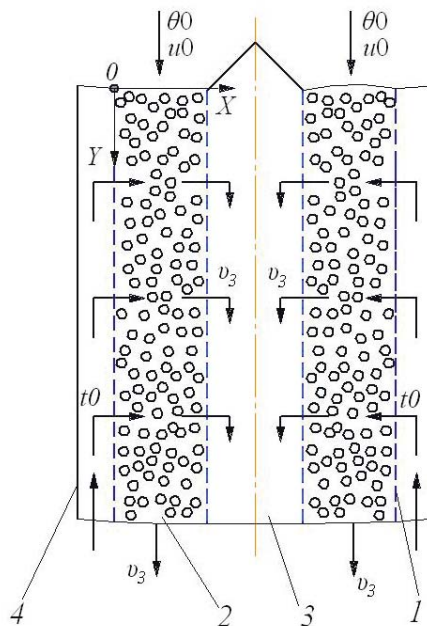
Методи досліджень. Використані рівняння збереження енергії та речовини, тепломасообміну. Застосовані основні положення теорії сушіння. Аналітичні залежності були одержані на основі розв'язку неоднорідних диференціальних рівнянь першого порядку та алгебраїчних рівнянь. Також використовувалися методи математичного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо схему роботи сушильної камери баштової сушарки зі всмоктувальним повітряним потоком (рис. 1).

Зерно з початковою температурою θ_0 та вологістю u_0 надходить у кільцевий сушильний канал 2, в якому через зовнішню циліндричну перфоровану стінку 1 в зерновий шар засмоктується сушильний агент від теплогенератора з початковою температурою t_0 . Сушильний агент, просочуючись через зерновий шар зі швидкістю v_c , віддає зерну теплову енергію й забирає з нього вологу. Відпрацьований сушильний агент засмоктується у внутрішній циліндричний канал 3. Зерно, рухаючись униз по сушильному кільцевому каналу зі швидкістю v_z , поступово нагрівається та висушується.

Рух сушильного агента перпендикулярно руху зерна обумовлений тим, що з метою зменшення аеродинамічного опору необхідно мінімізувати шлях сушильного

агента в зерні. Для керування сушильним процесом, схема якого показана на рисунку 1, необхідно знайти залежність вологості та температур зерна й сушильного агента вздовж і впоперек кільцевого сушильного каналу залежно від режимних параметрів і технологічних властивостей зерна. Для цього введемо декартову систему координат, початок якої поставимо на крайній верхній лівій точці кільцевого сушильного каналу 2. Вісь X направимо від зовнішньої циліндричної стінки 1 перпендикулярно до стінки внутрішнього перфорованого каналу 3. Вісь Y направимо вздовж зовнішньої циліндричної стінки 1 вниз.



1 – зовнішня перфорована циліндрична стінка сушильного каналу; 2 – кільцевий сушильний канал;
3 – внутрішній циліндричний перфорований канал; 4 – зовнішня повітронепроникна стінка башти.

Рисунок 1 – Схема роботи сушильної камери баштової зерносушарки:

Джерело: розроблено авторами

Під час моделювання будемо вважати, що технологічні параметри зерна та сушильного агента незмінні в часі, також введемо такі додаткові спрощення:

- швидкість переміщення зерна протягом руху однакова;
- втрати теплоти в докільця не враховуються, їх можна визначити під час розрахунку витрат теплоти на сушіння;
- процес теплообміну відбувається за законом конвекції Ньютона, а видалення вологи з поверхні зерна – за законом Дальтона;
- внутрішній тепломасоперенос – безградієнтний, тобто температура на поверхні й усередині зернини однакова;
- розмір поверхонь нагріву та вологовидалення однаковий, а їхня різниця враховується коефіцієнтом масообміну, який віднесено до поверхні волого обміну.

З врахуванням прийнятих припущень для вибраної моделі баштової зерносушарки на основі аналізу балансів теплоти та маси між сушильним агентом і зерном складено наступні диференціальні рівняння:

- рівняння збереження енергії для зерна

$$\rho_3 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot c_3 \cdot v_3 \cdot \frac{d\theta}{dy} + r_0 \cdot \rho_3 \cdot v_3 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{dU}{dy} = c_p \cdot \rho_c \cdot \varepsilon \cdot v_c \cdot \frac{dt}{dx}; \quad (1)$$
- рівняння теплообміну для сушильного агента (баланс теплоти)

$$\rho_c \cdot c_p \cdot \varepsilon \cdot v_c \cdot \frac{dt}{dx} = \alpha \cdot f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\theta - t); \quad (2)$$

- рівняння матеріального балансу для зерна

$$-\rho_z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot v_z \cdot \frac{dU}{dy} = \varepsilon \cdot \rho_c \cdot v_c \cdot \frac{dD}{dx}; \quad (3)$$

- рівняння масообміну

$$-\rho_z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot v_z \cdot \frac{dU}{dy} = f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \beta \cdot [P_z(\theta) - P_a(D)] \cdot \frac{r_0}{P}. \quad (4)$$

У рівняннях (1)–(4) позначено:

ρ_z, ρ_c – щільність зерна і густина сухого повітря, кг/м³;

ε – порозність зернового шару;

c_z, c_p – питомі теплоємності зерна і сушильного агента, Дж/кг·°С;

v_z, v_c – швидкість переміщення зерна і сушильного агента, м/с;

θ, t – температура зерна і сушильного агента, °С;

r_0 – питома теплота випаровування, Дж/кг;

U, D – вологовміст зерна і сушильного агента, відповідно, % та кг/кг с. р.;

x, y – ширина та висота зернового стовпа в процесі сушіння, м;

α, β – коефіцієнти теплообміну та масообміну, відповідно, Вт/м²·°С і кг/Па·с·м²;

f – питома поверхня зерна, м²/м³;

$P_z(\theta), P_a(D)$ – парціальний тиск водяної пари на поверхні нагрітого до температури θ зерна та в сушильному агенті, Па;

P_0, P – атмосферний тиск та розрідження в сушильній камері, Па.

Залежність парціального тиску вологи на поверхні зерна, яка дорівнює тиску насиченої пари за температури θ зерна можна апроксимувати лінійною залежністю:

$$P_z(\theta) = a \cdot \theta + c, \quad (5)$$

у сушильному агенті:

$$P_a(D) = b \cdot D, \quad (6)$$

де $a = 4,45$; $b = 1,14$; $c = -124$ – сталі емпіричні коефіцієнти [7].

Використовуючи визначення критерію Ребіндера [3] $R_b = \frac{c_p \cdot d\theta}{r_0 \cdot dU}$, зробимо в рівнянні (1) заміну:

$$-\frac{dU}{dy} = \frac{c_p}{r_0 \cdot R_b} \cdot \frac{d\theta}{dy}. \quad (7)$$

Після відповідних алгебраїчних перетворень рівнянь (1) та (2) одержимо:

$$\theta = t + A \cdot \frac{dt}{dx}; \quad (8)$$

$$t = \theta - B \cdot \frac{d\theta}{dy}. \quad (9)$$

$$\text{де } A = \frac{\rho_c \cdot c_p \cdot \varepsilon \cdot v_c}{\alpha \cdot f \cdot (1 - \varepsilon)}, B = \frac{\theta_z \cdot c_p \cdot v_z \cdot (R_b - 1)}{\alpha \cdot f \cdot R_b}.$$

Розв'язок системи рівнянь (8) та (9) за граничних умов: $x = 0, y = 0, t = t_0, \theta = \theta_0$ (де t_0, θ_0 – температура сушильного агента і зерна на вході в сушарку) отримаємо у вигляді:

$$\theta(y) = [\theta_0 - t(x)] \cdot e^{-\frac{1}{B}y} + t(x); \quad (10)$$

$$t(x) = [t_0 - \theta(y)] \cdot e^{-\frac{1}{A}x} + \theta(y). \quad (11)$$

Вирішивши систему алгебраїчних рівнянь (10) і (11), отримаємо аналітичні залежності температури зерна та сушильного агента по ширині та довжині кільцевого сушильного агента залежно від режимних параметрів:

$$\theta(x, y) = \frac{t_0 \cdot e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - \theta_0 \cdot e^{-\frac{1}{B}y}}{e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - e^{-\frac{1}{B}y}}; \quad (12)$$

$$t(x, y) = \frac{\theta_0 \cdot e^{-\frac{1}{B}y} \cdot \left(e^{-\frac{1}{A}x} - 1 \right) - t_0 \cdot e^{-\frac{1}{A}x}}{e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - e^{-\frac{1}{B}y}}. \quad (13)$$

Прирівнюючи рівняння (3) і (4), з урахуванням (5) та (6), матимемо:

$$\varepsilon \cdot \rho_c \cdot v_c \cdot \frac{dD}{dx} = f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \beta \cdot (a \cdot \theta + c - b \cdot D) \cdot \frac{F_0}{F}. \quad (14)$$

Підставляючи значення θ з (12) в (14), після відповідних перетворень отримаємо рівняння:

$$A1 \cdot \frac{dD}{dx} + b \cdot D = \frac{a \cdot \left[t_0 \cdot e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - \theta_0 \cdot e^{-\frac{1}{B}y} \right]}{e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - e^{-\frac{1}{B}y}} + c, \quad (15)$$

$$\text{де } A1 = \frac{\rho_c \cdot v_c \cdot F}{\beta \cdot F_0 \cdot f \cdot (1 - \varepsilon)}.$$

Рівняння (15) є неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку. Його рішення не може бути виражене через елементарні функції, тому воно представлено у вигляді нескінченного числового ряду, що сходиться. Рішення одержано за початкових умов: $x = 0$, $D = D_0$, де D_0 – вологовміст сушильного агента на вході в сушарку:

$$D(x, y) = T + e^{-\frac{b}{A1}x} \cdot \{ D_0 - T - F1 \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{B}y} \right)^n}{n} \cdot [A1 - A \cdot b \cdot n] \cdot \left[1 - e^{-\frac{n}{A \cdot A1} (A1 - A \cdot b \cdot n) x} \right] \}, \quad (16)$$

$$\text{де } T = \frac{a \cdot t_0 + c}{b}; F1 = \frac{A \cdot (t_0 + \theta_0 \cdot a)}{A1^2}.$$

Продиференціювавши рівняння (16) й підставивши отримане значення в рівняння (3), після перетворень матимемо:

$$-C1 \cdot \frac{dU}{dy} = -\frac{b}{A1} \cdot e^{-\frac{b}{A1}x} \cdot \{ D_0 - T - F1 \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{B}y} \right)^n}{n \cdot A1 \cdot A} \cdot \left[A \cdot A1 - e^{-\frac{n}{A \cdot A1} (A1 - A \cdot b \cdot n) x} \cdot (A \cdot b \cdot n^2 - n \cdot A1 - A \cdot A1) \right] \}. \quad (17)$$

Інтегрування рівняння (17) за початкових умов: $y = 0$, $U = U_0$ приводить до залежності:

$$U(x, y) = \frac{b}{C1 \cdot A1} \cdot e^{-\frac{b}{A1}x} \cdot (D_0 - T) \cdot y + \\ + F1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A \cdot A1 - e^{-\frac{n}{A \cdot A1} (A1 - A \cdot b \cdot n) x}}{n \cdot A1 \cdot A} \cdot (A \cdot b \cdot n^2 - n \cdot A1 - A \cdot A1) \cdot \frac{(-1)^n}{\Gamma(-n)} \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma(k-n) \cdot (k-n)}{A \cdot \Gamma(k+1)} \cdot \left[1 - e^{-\frac{k-n}{A}y} \right] + U_0, \quad (18)$$

$$\text{де } C1 = \frac{\rho_1(1-\varepsilon) \cdot v_3}{\rho_2 \cdot v_2 \cdot \varepsilon};$$

Γ – гамма-функція [6].

У практичних розрахунках нескінченні числові ряди в залежності (18) завжди мають кінцеву кількість членів, тоді різниця $k - n = 0$. Отже, в практичних розрахунках вираз (18) набуває такого вигляду:

$$U(x, y) = \frac{b}{C1 \cdot A1} \cdot e^{-\frac{b}{A1} x} \cdot (D0 - T) \cdot y + U0. \quad (19)$$

Отже, одержані залежності (12), (13), (16) і (19) дають можливість визначити режимні параметри сушіння (t , θ , D , U) в баштовій зерносушарці зі всмоктувальним повітряним потоком на виході, а також проаналізувати їх у будь-якій точці кільцевого сушильного каналу (рис. 1) та визначити раціональний режим (рис. 2).

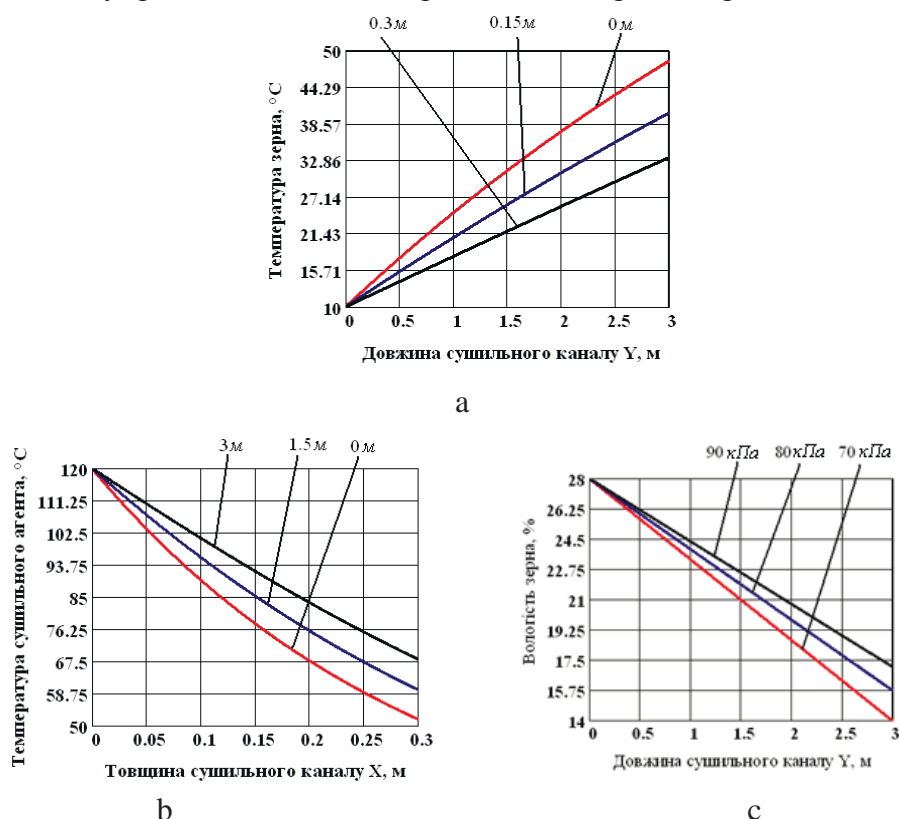


Рисунок 2 – Зміна температури (а) та вологості (с) зерна по довжині сушильного каналу на різній товщині та різному розрідженні; зміна температури сушильного агента (b) по товщині сушильного каналу на різній його довжині

Джерело: розроблено авторами

Зміною швидкості переміщення зерна v_3 вздовж сушильного каналу та швидкості продування зернового шару v_2 сушильним агентом можливо досягти ізотермічного режиму сушіння.

Висновки. Розроблені аналітичні залежності зміни основних параметрів сушіння (вологість та температура зерна, вологовміст та температура сушильного агента) по довжині та ширині сушильного каналу в баштових сушарках зі всмоктувальним повітряним потоком дають можливість зв'язати основні режимні параметри, що полегшує вибір раціональних режимів сушіння.

Список літератури

1. Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур / [колектив авторів]; за ред. В. І. Кравчука. Дослідницьке, 2011. 224 с.
2. Гапонюк О. І. Активне вентилування і сушіння зерна. Одеса, 2014. 325 с.
3. Гинзбург А. С. Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М., 1985. 336 с.
4. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя та ін. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 552 с.
5. Швидя В. О., Анеляк М. М., Степаненко С. П. Обґрунтування використання всмоктуючого повітряного потоку при сушінні зерна. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний зб.* 2017. Вип. № 6 (105). С. 81–86.
6. Waldschmidt M. Transcendence of Periods: The State of the Art. *Pure Appl. Math. Quart.* 2. 2006. Pp. 435–463. doi:10.4310/pamq.2006.v2.n2.a3.
7. Краусп Р. В. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. Москва, 1975. 227 с.
8. Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Котов Б. І. Математична модель процесу сушіння з перехресним рухом зерна і сушильного агента при його секційному вводі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка.* 2019. Вип. 199. С. 75-83.
9. Котов Б. І., Степаненко С. П., Швидя В. О. Моделювання і розрахунок режимних параметрів зерносушарок періодичної дії. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.* 2016. Вип. 34. С. 74-80.
10. Експериментальні дослідження режимів сушіння насіння зернових культур із високою вологістю в середовищі низького тиску / Роговський І. Л. та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering.* Vol. 57, № 1/2019. P. 141 – 146.
11. Котов, Б. І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних сушарок сільськогосподарських матеріалів. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.* 2016. Вип. 35. С. 64–72.
12. Котов, Б. І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Наближений метод розрахунку кінетики сушіння сільськогосподарських матеріалів у нерухомому шарі активним вентилуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК: Всеукр. наук.-техн. журнал.* 2016. Вип. 1(93). С. 48-51.
13. Котов Б.И., Степаненко С.П., Швидя В.А. Системно-проектный подход к управлению комплексом машин на току. *Труды Таврийского государственного агротехнологического университета.* 2012. Вип. 12, т. 5. С. 78–85 (Украина).
14. Степаненко С.П., Швидя В.О., Попадюк І.С. Аналіз розвитку конструкцій пневмосепаруючих систем сепараторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства.* 2017. Вип.5(104). С.132–142.

References

1. *Mashyny, ahrehaty ta komplekxy dlia pisliazybral'noi obrobky i zberihannia zernovykh kul'tur [Machines, units and complexes for post-harvest processing and storage of grain crops].* (2011). (V. I. Kravchuk Ed.). Doslidnyts'ke [in Ukrainian].
2. Gaponyuk, O. I. (2014). *Aktyvne ventyliuvannia i sushinnia zerna [Active ventilation and grain drying. Odessa]* [in Ukrainian].
3. Ginzburg, A. S. (1985). *Raschjot i proektirovanie sushil'nyh ustanovok pishhevoj promyshlennosti [Calculation and design of drying plants for the food industry].* Moscow [in Russian].
4. Kotov, B. , Stepanenko, S. , Shvidya, V. and et. al. (2017). *Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'iektakh pisliazybral'noi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia) [Modeling of technological processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling)].* Nizhin : Publisher PP Lisenko M. [in Ukrainian].
5. Shvydya, V. O., Anelyak, M. M., Stepanenko, S. P. (2017). *Obgruntuvannia vykorystannia vsmoktuiuchoho povitrianoho potoku pry sushinni zerna [Rationale for the use of suction air flow during grain drying].* *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil'skoho hospodarstva : zahal'nodержavnyj zb. – Mechanization and electrification of agriculture : a national collection, 6 (105),* 81–86 [in Ukrainian].
6. Waldschmidt, M. (2006). Transcendence of Periods: The State of the Art. *Pure Appl. Math. Quart.* 2, 435–463. doi:10.4310/pamq.2006.v2.n2.a3 [in English].

7. Krausp, R. V. (1975). *Avtomatizacija posleuborochnoj obrabotki zerna [Automation of post-harvest grain processing]*. Moscow [in Russian].
8. Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S. P., Shvydya, V. O., Kotov, B. I. (2019). Matematychna model' protsesu sushinnia z perekhresnym rukhom zerna i sushyl'noho ahenta pry joho sektsijnomu vvodi [Mathematical model of the drying process with cross-movement of grain and drying agent at its sectional input]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. Petra Vasylenka – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko, 199, 75–83* [in Ukrainian].
9. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. & Shvydya, V. O. (2016). Modeliuvannia i rozrakhunok rezhymnykh parametriv zernosusharok periodychnoi dii [Modeling and calculation of regime parameters of batch grain dryers]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery, 34, 74-80* [in Ukrainian].
10. Rohovs'kyi, Y. L., Tytova, L. L., Trokhanyak, V. Y. & et al. (2019). Eksperymental'ni doslidzhennia rezhymiv sushinnia nasinnia zernovykh kul'tur iz vysokoju volohistiu v seredovyschi nyz'koho tysku [Experimental studies of drying regimes of seeds of cereals with high humidity in low pressure environment]. *INMATEH - Agricultural Engineering, Vol. 57, № 1, 141 – 146* [in Ukrainian].
11. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. & Shvydya, V. O. (2016). Vrahuvannia rozpodilenosti parametriv pry modeliuvanni dynamichnykh susharok silskohospodarskykh materialiv [Considering the distributed account settings at modeling dryers dynamic agricultural materials]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery, 35, 64–72* [in Ukrainian].
12. Kotov, B. I., Stepanenko, S.P., Shvydya, V. O. (2016). Nablyzhenyj metod rozrakhunku kinetyky sushinnia sil's'kohospodars'kykh materialiv u nerukhomomu shari aktyvnym ventyliuvanniam [An approximate method for calculating the kinetics of drying of agricultural materials in a fixed bed by active ventilation]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK: Vseukr. nauk.-tekhn. zhurnal – Technology, energy, transport agro-industrial complex: All-Ukrainian scientific and technical journal, Issue. 1 (93), 48-51* [in Ukrainian].
13. Kotov, B. I., Stepanenko, S.P., Shvydya, V.O. (2012). Sistemno-proektnyj podhod k upravlenniu kompleksom mashin na toku [System-design approach to the management of a complex of machines on current]. *Proceedings of the Tavriya State Agrotechnological University – Trudy Tavrijskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta, Issue. 12, Vol. 5, 78–85* [in Ukrainian].
14. Stepanenko, S.P., Shvydya, V.O. & Popadyuk, I.S. (2017). Analiz rozvytku konstruksij pnevmoseparuiuchykh system separatoriv [Analiz rozvytku konstruksiy pnevmoseparuyuchykh system separatoriv]. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva – Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva, №.5(104), 132–142* [in Ukrainian].

Viktor Shvidia, PhD tech. sci., **Serhii Stepanenko**, PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center “Institute of Agricultural Mechanization and Electrification”, Glevakha, Ukraine

Mathematical Modeling of the Process of Operation of the Drying Chamber of a Tower Grain Dryer With a Suction Air Flow

In the article, a drying scheme in a tower grain dryer has been developed, equations for the conservation of energy and material balance for grain, equations for mass transfer and heat transfer between the drying agent and grain have been drawn up. On their basis, analytical dependences of changes in the temperature and moisture content of grain, moisture content and temperature of the drying agent along and in the width of the drying channel were obtained, depending on the operating parameters (the value of rarefaction in the drying channel, the speed of grain movement along the drying channel, the speed of movement of the drying agent, the initial temperatures of the grain and drying agent, initial moisture content of grain, as well as initial moisture content of drying agent). Their analysis facilitates the work in choosing the optimal mode.

The developed analytical dependences of changes in the main drying parameters (moisture and temperature of grain, moisture content and temperature of the drying agent) along the length and width of the drying channel in tower dryers with suction air flow make it possible to link the main operating parameters, which facilitate the choice of rational drying modes.

grain, drying agent, tower grain dryer, drying channel, suction air flow, vacuum, operating parameters of the grain dryer

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020