

УДК 631.362.7

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНА В УСТАНОВКАХ З РАДІАЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ПОВІТРЯ

Борис Котов<sup>1</sup>, д. т. н., Роман Калініченко<sup>2</sup>, к. т. н., Сергій Степаненко<sup>3</sup>, д. т. н.,  
Юрій Панцир<sup>1</sup>, к. т. н.

<sup>1</sup>ЗВО «Подільський державний університет»,  
вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., Україна  
e-mail: panziyuriy@gmail.com

<sup>2</sup>ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»,  
вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна  
e-mail: rkalinichenko@ukr.net

<sup>3</sup>Інститут механіки та автоматики АПВ,  
вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха, Київська обл., Україна,  
e-mail: Stepanenko\_s@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>

#### Котов Б., Калініченко Р., Степаненко С., Панцир Ю. Математичне моделювання процесу охолодження зерна в установках з радіальною подачею повітря

Необхідність створення або вдосконалення існуючих установок для охолодження зерна після сушіння, які функціонують окремо від зернової сушарки (виносні охолоджувач зерна) на сьогодні зумовлена вимогами підвищення продуктивності сушарок у господарствах (за рахунок використання охолоджувальних камер як сушильних) та появою в господарствах зерносушарок, агрегованих з топками на твердому паливі, які працюють при періодичному завантаженні. Одним із шляхів розв'язання задач створення виносних охолоджувачів зерна після сушіння є використання вентиляованих бункерів з радіальним розподілом зовнішнього атмосферного повітря для охолодження зерна. Для їх ефективного використання й узгодження продуктивності охолоджувача та сушарки необхідно вивчити закономірності перебігу процесу теплообміну в нестационарному режимі і визначити оптимальні конструктивні і режимні параметри. Такі дослідження доцільно проводити на основі створення математичних моделей нестационарних теплових процесів при охолодженні нагрітого і висушеного зерна. У роботі побудовано математичну модель процесу охолодження зерна в бункерних установках з радіальною повітряною роздачею за схемою дворівневої ієрархії: модель мікрокінетики і макрокінетики охолодження зерна. На рівні мікрокінетики використано рівняння нестационарної теплопровідності зернівки (або елемента шару зерна) з негативним джерелом теплоти з граничними умовами конвективного теплообміну. На другому рівні модель охолодження зерна представлена диференціальним рівнянням теплообміну кільцевого зерна з радіально рухомим охолоджувальним повітрям. Розв'язок рівняння реалізовано в комп'ютерному середовищі Mathematica, для двох варіантів руху повітря: від центру бункера до зовнішньої поверхні і в протилежному напрямі. Результати розрахунків графічно проілюстровані. Встановлено, що нерівномірність розподілу температури зерна за радіальною координатою в стадії завершення процесу при фільтрації шару зерна повітрям від зовнішнього циліндра до внутрішнього менша на 20-30 %, ніж при фільтрації повітря у зворотному напрямі.

**Ключові слова:** зерно, охолодження, теплообмін, повітря, бункер, радіальний рух повітря.

#### Kotov B., Kalinichenko R., Stepanenko S., Pantzyr Yu. Mathematical modeling of grain cooling in bunker systems with radial air distribution

The need to create or improve the existing grain cooling systems after drying, which operate separately from grain dryers (portable grain coolers), is currently caused by the requirements to increase the efficiency of dryers on farms (by using cooling chambers as drying units) and the emergence of integrated grain dryers with solid fuel furnaces that operate with periodic loading. One way to address the challenges of creating portable grain coolers after drying is to utilize ventilated bunkers with radial distribution of external atmospheric air for grain cooling. To ensure their effective operation and to align the productivity of the cooler with that of the dryer, it is essential to study the patterns of heat exchange in non-steady-state conditions and determine optimal structural and operational parameters. Such research is best conducted by developing mathematical models of non-steady-state thermal processes during the cooling of heated and dried grain. The present work proposes a developed mathematical model of the grain cooling process in bunker systems with radial air distribution based on a two-level hierarchy: microkinetics and macrokinetics of grain cooling.

At the microkinetics level, the equation of non-steady-state heat conduction for a grain particle (or a grain layer element) with a negative heat source is employed, along with the boundary conditions for convective heat exchange. At the second level, the grain cooling model is represented by a differential equation for heat exchange of a ring-shaped grain

element with radially moving cooling air. The solution to this equation is implemented in the Mathematica computer environment for two airflow scenarios: from the center of the bunker to the outer surface and in the opposite direction. The results of the calculations are graphically illustrated. It has been determined that the temperature non-uniformity of grain along the radial coordinate of the layer during the final stage of the process, with air filtration from the external cylinder to the central one, is 20-30 % lower than when air filtration is carried out in the reverse direction.

**Key words:** grain, cooling, heat exchange, air, bunker, radial airflow.

**Постановка проблеми.** На сьогодні сушильний парк господарств – виробників зерна представлено переважно шахтними зерносушарками різноманітних конструкцій [7; 11]. Як показала практика експлуатації [11], шахтні зерносушарки, внаслідок певних конструктивних недоліків, не забезпечують необхідного нормованого ефекту охолодження висушеного зерна. Конструктивні недоліки шахтних охолоджувачів з повіторозподільними коробами, які є продовженням сушильних камер зерносушарки, зумовлені прагненням універсальності конструктивних елементів – блоків, з яких складаються зерносушарки, що притаманні всім навіть модернізованим конструкціям.

Це пояснюється тим, що дослідження останніх років у галузі зерносушіння були спрямовані, переважно, на інтенсифікацію процесу сушіння. Важливому процесу охолодження висушеного зерна не було приділено належної уваги дослідниками. Поява останніми роками в господарствах зерносушильної техніки, яка агрегатована топковими пристроями, що працюють на твердому паливі (рослинні рештки, солома, деревні пелети тощо), висунула нові вимоги до проблеми охолодження висушеного зерна. Як правило, зерносушарки бункерного, колонкового або шахтного типів незначної продуктивності функціонують у режимі періодичного завантаження, а топкові установки працюють у безперервному режимі. Звідси виникає потреба створення виносних (позасушильних) охолоджувачів просушеного зерна.

Найпростішою конструкцією реалізації охолоджувача зернового матеріалу є колонкова установка з радіальним розподілом охолоджувального повітря в кільцево-циліндричному шарі зерна. Особливістю такої конструкції є зміна швидкості фільтрувального повітря: зменшення швидкості повітря при русі від внутрішнього циліндра до зовнішнього або збільшення швидкості при русі в зворотному напрямі. Це ускладнює розрахунки нестационарного теплообміну охолоджувального повітря із зерном. На сьогодні відсутні методики визначення раціональних (оптимальних) режимів охолодження зерна примусовою фільтрацією повітря крізь кільцевий шар зерна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Охолодження висушеного зерна є обов'язковою, нормованою інструкцією [4] операцією, яка давно застосовується разом з процесом сушіння. Дослідження обладнання для охоло-

дження зерна досить детально висвітлене у відомих працях [1; 7; 11] і публікаціях [2; 3; 13–15].

Вивчення закономірностей охолодження зерна повітряними потоками, зокрема у щільному рухомому та нерухомому шарі [10; 12], у псевдозрідженому шарі [9] методами наближених розрахунків є доволі поширеним, однак вони не відтворюють реальної картини динаміки комплексної зміни всіх показників і параметрів процесу.

Поряд з методами досліджень у працях, що перелічені вище, застосовуються методи числового моделювання з використанням комп'ютерних середовищ Mathcad [16] і Matlab [8].

Доробком авторів цієї праці є ряд узагальнених існуючих та розроблених математичних моделей процесів охолодження рослинної сировини [7; 11], а також метод ідентифікації математичних моделей за даними прямих експериментів [5; 6].

Однак вищезгадані прикладні комп'ютерні програми не надають можливості точних розв'язків диференціальних рівнянь у частинних похідних. Тому виникає потреба у створенні й аналізі більш точного математичного опису динаміки теплових процесів в охолоджувальних установках, які більш детально враховуватимуть особливості динамічних процесів.

**Постановка завдання.** Побудова математичної моделі нестационарного теплообміну в процесі охолодження зерна при змінних в часі та за координатами основних режимних параметрах процесу та її ідентифікація за даними експериментальних досліджень з метою розробки практичних рекомендацій з визначення раціональних режимних і конструктивних параметрів бункерно-колонкових охолоджувачів зерна.

**Виклад основного матеріалу.** При складанні математичного опису використовувалась методологія побудови багато- (дво-) рівневої математичної моделі охолодження зерна в рухомому циліндричному шарі матеріалу (з кільцевим поперечним перетином) за використання двоступеневої ідентифікації параметрів. На першому етапі формулюється модель елементарного шару (моношару) зерна або однієї зернівки, на другому етапі-макрорівні складається двовимірна математична модель стаціонарного теплообміну в гравітаційно -рухомому кільцево-циліндричному шарі зерна при його охолодженні фільтрацією повітря в радіальному напрямі.

При формулюванні математичних моделей прийнято такі спрощення та припущення:

1. Зерновий матеріал переміщується (гравітаційно) зверху донизу рівномірним потоком повітря в радіальному напрямі рівномірно в поперечному перетині, змінюючи швидкість у напрямі руху.

2. Зернівки мають кулясту форму з еквівалентним діаметром  $d_e$  та коефіцієнтом форми  $\psi$ .

3. У зернівці діє негативне джерело теплоти, що моделює випаровування залишкової вологи (з постійною швидкістю).

$$\frac{\partial[r\theta(r,\tau)]}{\partial\tau} = a_{ef} \frac{\partial^2[r\theta(r,\tau)]}{\partial r^2} - \frac{q_V r}{c \cdot \rho}, \quad (0 < r < R);$$

(1)

з крайовими умовами:

$$-\frac{\partial\theta(R,\tau)}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda}(\theta(R,\tau) - t_c) = 0;$$

$$\theta(r, 0) = \theta_0; \frac{\partial\theta(0,\tau)}{\partial r} = 0; \theta(0, \tau) \neq 0,$$

де  $\theta, t_c$  – температура зерна та охолоджувального повітря;  $R, r$  – радіус зернівки та поточний радіус зернівки;  $q_V$  – об'ємне внутрішнє негативне джерело енергії;  $a_{ef}$  – ефективний коефіцієнт температуропровідності;  $c$  – питома теплоємність зерна;  $\rho$  – густина зерна;  $\alpha, \lambda$  – коефіцієнти теплообміну та теплопровідності зерна;  $\tau$  – поточний час;  $\varepsilon$  – критерій фазового переходу.

Розв'язок рівняння (1) з крайовими умовами (2) відомий [11]:

$$\theta_0 - \theta(r, \tau) = (\theta_0 - t_c) \left[ 1 + \frac{Po}{6} \left( 1 + \frac{2}{Bi} - \frac{r^2}{R^2} \right) \right] -$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( 1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left( -\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R} \tau \right) \right],$$

(3)

де  $Po = \frac{-q_V \cdot R^2}{\lambda(\theta_0 - t_c)}$  – критерій Померанцева;  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$  – критерій Біо;  $a_T = \frac{a_T}{1-\varepsilon}$ , де  $a_T$  – коефіцієнт температуропровідності;  $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$  – початкові теплові амплітуди;  $\mu_n$  – розв'язки характеристичного рівняння:  $-\mu = (Bi - 1) \operatorname{tg} \mu$ .

Оскільки теплообмін відбувається між повітрям та поверхнею зерна, то температура визначається експериментально пірометричним методом. Перепишемо рівняння (3) для температури поверхні зерна:

$$\theta_0 - \theta_n(\tau) = (\theta_0 - t_c) \left[ 1 + \frac{Po}{3Bi} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( 1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \exp \left( -\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R} \tau \right) \right].$$

(4)

Для використання алгоритму Левенберга-Марквардта в пошуку невідомих коефіцієнтів  $a_T$  та  $\lambda$ , потужності джерела  $q_V$  в рівнянні (3) визначаємо за даними емпіричних залежностей [7; 12]:

$$a_T = 14.7 - 10U; \lambda = 0.27 + 2U;$$

$$Bi = \frac{R}{\lambda} \left[ 0.06V^{0.79} d_e^{-0.21} \frac{(1-\varepsilon_0)^{0.21}}{\varepsilon_0} \lambda V^{-0.79} \right]^{1.163},$$

(5)

де  $\varepsilon_0$  – порозність шару зерна.

Розв'язки трансцендентного рівняння  $\mu = f(Bi)$  апроксимуємо залежностями: для  $(\mu_1) - \mu_1 = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^{0.3}$ ; для  $(\mu_2 - \mu_6) - \mu = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^2$ .

Для того щоб зменшити вплив випадкових і систематичних похибок, які виникають під час проведення експерименту, на результат визначення кінетичних коефіцієнтів, при розв'язанні зворотної задачі теплообміну, експериментальні дані кінетики охолодження зерна у шарі, що продувається, апроксимовані (для подальших розрахунків як масиву даних) емпіричними залежностями у вигляді:

$$\theta(\tau) = t_0 + (\theta_0 - t_0) e^{-0.54\tau};$$

(6)

для елементарного шару  $h=0,025\text{м}$  при питомих витратах повітря  $0,63 \text{ кг/кг}\cdot\text{с}$  та при різній висоті шару:

$$\theta(\tau, h) = t_0 + (\theta_0 - t_0) e^{-m(h)\tau},$$

(7)

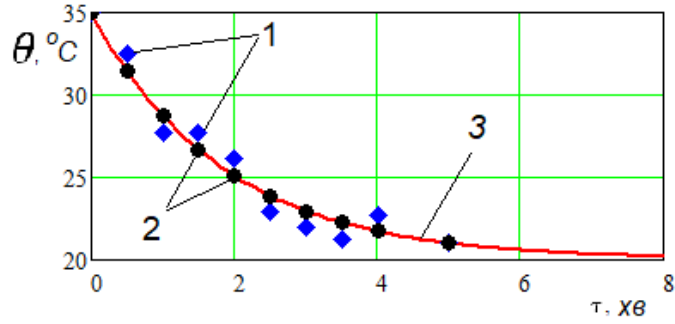
де  $m(h) = 0,078h^{-0.54}$  – коефіцієнт охолодження в регулярному режимі.

На рис. 1 представлено точки, отримані за емпіричною залежністю (6) і кривою, що визначена функцією `genfit` в Mathcad за рівнянням (4).

4. Усі види теплообміну враховуються коефіцієнтом теплообміну, який в часі не змінюється і дорівнює середньому значенню за процес.

5. Теплопровідністю шару зерна і теплообміном з навколишнім середовищем нехтуємо.

За таких умов кількісний опис процесу охолодження зернівки потоком повітря (вимушеною конвекцією) можна представити диференціальним рівнянням теплопровідності з негативним джерелом теплоти [7]



**Рис. 1.** Кінетика охолодження елементарного шару зерна (1 – експериментальні точки; 2 – точки за емпіричною залежністю (6); 3 – крива, визначена з рівняння (4))

**Fig. 1.** Kinetics of cooling the elementary layer of grain (1 – experimental points; 2 – points by empirical dependence (6); 3 – curve defined with equation (4))

Підстановкою залежностей  $(\mu_2 - \mu_6)$  від  $Bi$  в рівняння (4) і використовуючи вбудовану функцію `genfit` у математичному пакеті `Mathcad`, яка реалізує алгоритм Левенберга-Марквардта, визначені фактичні значення  $Bi$ ,  $a_{ef}$ . При цьому  $q_V = r_0 \frac{m_b}{\tau_{ox} V_3}$ , де  $m_b$  – кількість вологи, видаленої із зерна об'ємом  $V_3$  за час  $\tau_{ox}$ ;  $r_0$  – питома теплота пароутворення води.

Для спрощення подальшого аналізу визначимо середньооб'ємну температуру зернівок за очевидною формулою  $\bar{\theta}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \theta(r, \tau) dr$  і, обмежившись першим членом ряду (регулярний режим), отримаємо:

$$\bar{\theta}(\tau) = t_c + (\theta_0 - t_c) \frac{Po}{15} \left[ 1 + \frac{5}{Bi_1} \right] - \left[ 1 + \frac{Po}{\mu_1^2} \right] B_n \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R} \tau\right), \quad (8)$$

$$\text{де } B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2 - Bi)}; \mu_1^2 = 3Bi.$$

Продиференціювавши залежність  $\bar{\theta}(\tau)$  за  $\tau$  і порівнявши отримане рівняння з (8), після перетворень матимемо:

$$-\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = k_0(t_c - \theta) + Q_V, \quad (9)$$

$$\text{де } k_0 = \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2} = 3Bi \frac{a_{ef}}{R^2}; Q_V = q_V \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2}.$$

Рівняння (9), яке визначає кінетику охолодження окремої зернини (елементарного шару зерна), відрізняється від відомих тим, що враховує не тільки зовнішній, а й внутрішній теплоперенос та видалення вологи.

Для отримання математичної моделі нестационарного теплообміну рухомого шару зерна в процесі охолодження (модель макрорівня) розкриємо повний диференціал  $d\bar{\theta} = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} dz$ . Враховуючи, що величина  $\frac{dz}{d\tau} = V_3$  є швидкістю переміщення зерна, то рівняння (9) матиме вигляд:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} + V_3 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = k_0(t_c - \theta) + Q_V. \quad (10)$$

Температура повітря, яке фільтрується крізь шар зерна, у радіальному напрямку буде змінюватися в часі ( $\tau$ ) та за координатою  $r$  (поточний радіус колонки).

Зміна тепловмісту (ентальпії) повітря при фільтрації крізь шар зерна:

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} dr = \frac{c_p \varepsilon V_n d\tau}{\partial r} dr. \quad (11)$$

Зміна тепловмісту повітря в часі:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau = \frac{c_p \varepsilon V_n d\tau \partial t}{\partial \tau} d\tau = \frac{c_p \varepsilon dr \partial t}{\partial \tau} d\tau; \quad V_n d\tau = dr. \quad (12)$$

При переміщенні повітря крізь шар зерна воно забирає теплоту від зерна на елементарній ділянці  $dr$  за час  $d\tau$  в кількості:

$$\partial \theta = \alpha F_V (\theta - t) dr d\tau, \quad (13)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $F_V = \sigma \rho_n$ ,  $\sigma = \frac{f}{m}$  – питома поверхня зерна,  $m$  – маса зерна,  $\rho_n$  – насипна густина зерна.

З рівнянь (11)–(13) матимемо:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_r(r) \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha F_V (\theta - t), \quad (14)$$

де  $V_r(r)$  – швидкість повітря в шарі за радіусом.

Значення швидкості повітря, що змінюється в напрямку руху, визначимо за залежністю

$$V_r(r) = \frac{L_n}{2\pi r H_n}, \quad (15)$$

де  $L_n$  – об’ємні витрати повітря,  $H_n$  – висота фільтрованого шару зерна.

Розрахункова схема охолодження зерна в циліндрично-колонковому шарі наведена на рис. 2

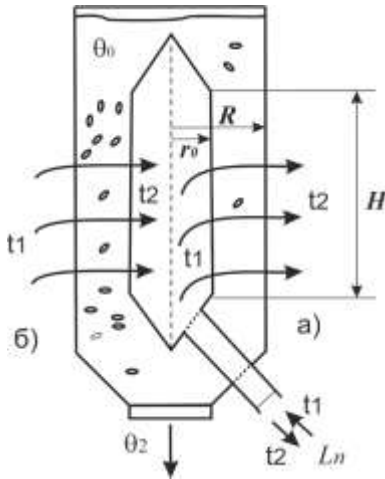


Рис. 2. Розрахункова схема охолодження зерна в циліндрично-колонковому шарі

Fig. 2. The calculation scheme for grain cooling in a cylindrical-columnar layer

Для практичних розрахунків можна знехтувати першою складовою в рівнянні (14), оскільки  $V_r \frac{\partial t}{\partial \tau} \gg \frac{\partial t}{\partial \tau}$ .

Таким чином, динаміка охолодження зерна при разовому завантаженні моделюється системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + V_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} &= k_0(t_c - \theta) + Q_V; \\ V_r(r) \frac{\partial t}{\partial r} &= \alpha(r) F_V(\theta - t). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При безперервному (стаціонарному) режимі охолодження зерна температура його в різних точках об’єму не буде залежати від часу ( $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$ ). Стаціонарний режим охолодження в безперервно діючому охолоджувачі описуватиметься системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} V_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} &= k_0(t_c - \theta) + Q_V; \\ V_r(r) \frac{\partial t}{\partial r} &= \alpha(r) F_V(\theta - t). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Для числового (комп’ютерного) розв’язку систем (16) та (17) необхідно мати числову залежність  $\alpha = f[V_r(\tau)]$ . Оскільки коефіцієнт теплообміну залежить від гідродинамічного режиму фільтрації повітря крізь шар зерна, що визначається значенням швидкості повітря на вході в шар зерна  $V_0$ , то для ідентифікації критеріальної залежності

$$Nu = A \cdot Re^n \quad (18)$$

було проведено експериментальні дослідження кінетики охолодження шару нагрітого зерна за різних значень швидкості повітря на вході в шар. Дані експериментів апроксимовано залежністю

$$\theta(\tau) = t_0 + (\theta_0 - t_0)e^{-m(V_r)\tau}. \quad (19)$$

Залежність коефіцієнта охолодження від швидкості повітря наведена на рис. 3.

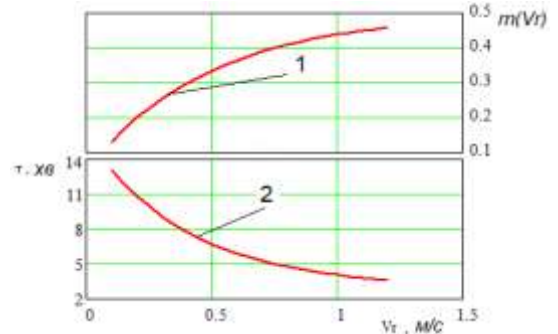


Рис. 3. Зміна коефіцієнта охолодження  $m(V_r)$  – крива 1;

експозиції охолодження  $\tau(V_r)$  (крива 2) від швидкості повітря

Fig. 3. Change in the cooling coefficient  $m(V_r)$  – curve 1; cooling exposure  $\tau(V_r)$  (curve 2) from the speed of the air

У результаті обробки отриманих експериментальних даних визначено критеріальне рівняння (18), яке можна представити в розгорнутому вигляді таким чином:

$$\alpha(r) = d_3^{-0,2} \frac{(1-\varepsilon)^{0,2}}{\varepsilon} \left(\frac{V_0 r_0}{r}\right)^{0,8} v^{-0,8} \cdot 0,0168, \dots \quad (20)$$

де  $d_3, \varepsilon$  – діаметр зернини та порозність шару;  $V_0, R_0$  – швидкість повітря на вході в шар та радіус внутрішнього циліндра бункера;  $v$  – кінематична в’язкість повітря.

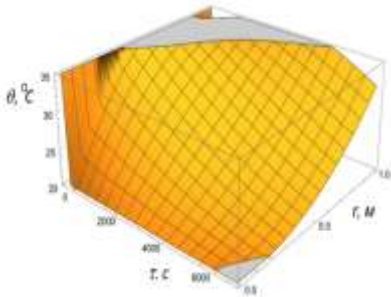
Задача дослідження теплообміну полягає у вивченні й оцінці умов найбільш повного використання охолоджувального повітря, що визначається рівністю температури повітря і зерна на виході з шару і, відповідно, визначає ефективність функціонування охолоджувальних пристроїв.

Для вивчення закономірностей зміни параметрів повітря та зерна за різних способів подачі охолоджувального повітря в зерновий шар (від внутрішнього до зовнішнього циліндра і навпаки за різних витрат повітря) проведено числові експерименти на основі отриманих систем рівнянь (16) та (17) при початкових умовах:  $\theta(0, r) = \theta_1$ ;  $t(\tau, R_0) = t$  – при фільтрації повітря від центрального циліндра до зовнішнього;  $\theta(0, r) = \theta_1$ ;  $t(\tau, R) = t$  – при фільтрації повітря від зовнішнього до внутрішнього циліндра.

Для роботи колонкового охолоджувача безперервної дії граничні умови записано у

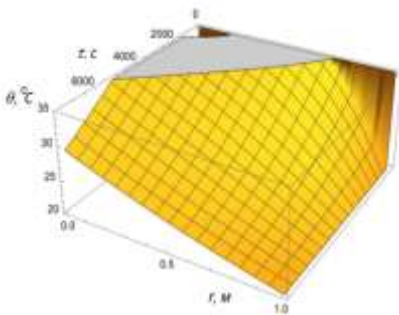
вигляді:  $z = 0; \theta = \theta_1; r = R_0; t = t_1$  – прямий рух повітря;  $z = 0; \theta = \theta_1; r = R; t = t_1$  – зворотний рух повітря.

Результати числового розв'язку систем рівнянь (16) та (17) у комп'ютерному середовищі Mathematica отримані у вигляді зміни параметрів повітря та зерна в часі і за радіальною координатою (рис. 4–6).



**Рис. 4.** Зміна температури шару зерна в процесі охолодження при фільтрації повітря від внутрішнього циліндра до зовнішнього

**Fig. 4.** Change in the temperature of the grain layer during cooling when air moves from the inner cylinder to the outer cylinder



**Рис. 5.** Зміна температури шару зерна в процесі охолодження при фільтрації повітря від зовнішнього циліндра до внутрішнього

**Fig. 5.** Change in the temperature of the grain layer during the cooling process under air filtration from the outer cylinder to the inner cylinder

Нерівномірність розподілу температури зернової маси за радіальною координатою за однакових значень технологічних параметрів процесу, але за різних напрямів фільтрації повітря наведено на рис. 6.

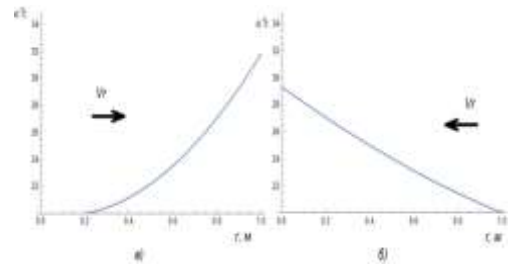
На рис. 4–6 проілюстровано, що при фільтрації охолоджувального повітря від центру бункера до зовнішнього циліндра нерівномірність розподілу температури зерна на внутрішньому і зовнішньому циліндрах на 25 % більша, ніж при фільтрації в протилежному напрямі, при визначеній експозиції охолодження.

**Рис. 6.** Розподіл температури зерна за радіальною координатою, експозиція  $\tau(V_f) = 2 \text{ год}$ :

**а)** при фільтрації повітря від внутрішнього циліндра до зовнішнього; **б)** при фільтрації повітря від зовнішнього циліндра до внутрішнього

**Fig. 6.** Distribution of grain temperature by radial coordinate, exposure  $\tau(V_f) = 2 \text{ h}$ : **a)** under air filtration

from the inner cylinder to the outer one; **b)** under air filtration from the outer cylinder to the inner one



**Висновки.** Удосконалено математичні моделі для дослідження динаміки процесу охолодження зерна в установках з радіальним розподілом охолоджувального повітря, які являють собою дворівневий математичний опис з проміжною процедурою ідентифікації теплофізичних коефіцієнтів. Моделі враховують особливості внутрішнього теплопереносу і зовнішнього теплообміну. Математична модель макrorівня з обчисленими коефіцієнтами за експериментальними даними є основою для розрахунку кінетики охолодження. Числовими експериментами визначено, що нерівномірність розподілу температури зерна за радіальною координатою в стадії завершення процесу при фільтрації шару зерна повітрям від зовнішнього циліндра до внутрішнього менша на 20-30 %, ніж при подачі повітря в зворотному напрямі. Це дозволяє переглянути рекомендації щодо використання вентиляційних бункерів для охолодження зерна після сушіння.

#### Бібліографічний список

1. Активне вентилявання та сушіння зерна / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич, І. І. Гапонюк. Одеса: ВМВ, 2014. 326 с.
2. Верхоланцева В. О. Визначення ефективності застосування методу охолодження зерна. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11., т. 1. С. 326-331.
3. Верхоланцева В. О. Обґрунтування режимних параметрів охолодження зернової сировини у процесі зберігання: дис. канд. техн. наук. Вінниця, 2016. 200 с.
4. Інструкції по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зернових сушарок / Г. Н. Станкевич та ін. Одеса: АРД-ЛТД, 1997. 72 с.
- Калініченко Р. А. Алгоритм параметричної ідентифікації аналітичного марема тичного опису динаміки низькотемпературного сушіння зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2016. № 3(102).
5. Калініченко Р. А. Визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння тепло провідності для ідентифікації процесів термообробки зерноматеріалів. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. №241. С. 325-333.

6. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Енергоефективні режими роботи машин для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів. Ніжин: Вид. центр НДУ ім. Гоголя, 2017. 261 с.
7. Котов Б. І., Грищенко В. О. Математична модель охолодження вологого зерна у вентилюємих бункерах з радіальним розподіленням повітря. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47 (1). С. 132–139.
8. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Кифяк В. В. Моделювання динаміки нагріву та охолодження зернопродуктів в режимі пневмотранспортера. *Інженерія природокористування*. 2015. № 1. С. 40–43.
9. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Курганський О. Д. Тепло- і масообмін при сушінні і охолодженні зернового матеріалу у щільному рухомому шарі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 1(96). С. 93–95.
10. Котов Б. І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилювання, охолодження): [кол. монографія] / Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». Київ; Ніжин: Лисенко М. М., 2017. 551 с.
11. Курганський О. Д., Котов Б. І. Аналіз способів охолодження зернового матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 2(94). С. 49–52.
12. Кюрчев С. В., Кюрчева Л. М., Верховланцева В. О. Визначення важливого фактора якості пшениці у процесі зберігання із застосуванням охолодження. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2018. Вип. 18, т. 1. С. 3-11.
13. Кюрчев С. В. Механіко-технологічне обґрунтування післязбиральної обробки та зберігання насіння зернових і олійних культур: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Глеваха, 2019. 40 с.
14. Паламарчук І., Кюрчев С., Верховланцева В. Віброхвильовий семіфлюїдизаційний процес низькотемпературної обробки рослинної сировини. *Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2018. С. 308-310.*
15. Theoretical research esofcooling process regularity of the grain material in the layer / B. Kotov, A. Spirin, I. Tverdokhlib, R. Kalinichenko. *INMATEH-AGRICULTURAL ENGINEERING*, 2018. Vol. 54. P. 87-94.

Стаття надійшла 10.05.2023