



УДК 631.365

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-12

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНА ПІСЛЯ СУШІННЯ І
ТЕРМООБРОБКИ**

Котов Борис Іванович, д.т.н., професор
Подільський державний аграрно-технічний університет
Калініченко Роман Андрійович, к.т.н., доцент
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»
Рудь Анатолій Володимирович, к.т.н., професор
Грушецький Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
Подільський державний аграрно-технічний університет

Borys Kotov, Doctor of Technical Sciences, Professor
State Agrarian and Engineering University in Podilia
Roman Kalinichenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Separated subdivision of NUBiP of Ukraine «Nizhyn Agrotechnical Institute»
Anatoliy Rud, Candidate of Technical Sciences, Professor
Sergiy Hrushetskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
State Agrarian and Engineering University in Podilia

Однією із основних вимог до зерносушарок є необхідність якісного охолодження зернового матеріалу після сушіння. На сьогодні найбільш широкое розповсюдження отримали охолоджувачі зерна що вбудовані в зерносушарки. Як показала практика експлуатації, шахтні зерносушарки, що отримали найбільше розповсюдження в сільському господарстві, з їх охолоджуючими зонами є малоефективними: температура зерна після охолодження часто перевищує температуру оточуючого повітря на 15-30 °С, що є неприпустимим. Установкам з коробами притаманні такі недоліки, як нерівномірність розподілу повітря в об'ємі зернової маси і відповідна нерівномірність температурного поля охолоджуючого повітря, обмежені можливості інтенсифікації теплообміну в процесі охолодження зерна.

Більш перспективними для сільськогосподарських зерносушарок є виносні охолоджувачі, які встановлюються окремо від сушарки і мають змогу працювати в самостійному режимі, що має ряд переваг: покращується якість охолодження, збільшується продуктивність діючих зерносушарок за рахунок використання охолоджуючої частини в якості сушильної.

Основними недоліками використання існуючих виносних колонкових охолоджувачів є необхідність додаткового транспортного засобу – норії для перезавантаження зерна від сушарки до колонки і вертикальна компоновка, що зумовлює застосовувати транспортуючі засоби значної висоти. Але якщо в якості транспортного засобу використовувати пневмотранспортний завантажувач з пульсуючим потоком повітря то ефективність охолоджувачів можна підвищити за рахунок відйому частини акумульованої зерном теплоти транспортуючим повітряним потоком.

В роботі запропоновано аналітичне обґрунтування підвищення ефективності охолоджувачів із пневмотранспортним переміщенням в пульсуючому потоці повітря.

Ключові слова: охолодження зерна, математична модель, повітряний потік, виносні колонкові охолоджувачі.

Ф. 18. Рис. 6. Літ. 19.

1. Постановка проблеми

Одним із важливих завдань вдосконалення технології сушіння та термічної обробки зерна є підвищення ефективності охолодження зневодненої зернової продукції, до якої ставляться зростаючі вимоги. В більшості конструкцій діючих зерносушарок (переважно шахтні з повітророзподільними коробами), незважаючи на умови їх роботи і призначення, сушильні і охолоджувальні камери суміщені в одній установці і мають однакову конструкцію.

Як показала практика експлуатації, отримавши найбільше розповсюдження в сільському господарстві охолоджуючі шахти з коробами є малоефективними: температура зерна після



охлаждения часто превышает температуру окружающего воздуха на 15-30 °С, что является неприпустимым. Практично ні на одному із типів існуючих зерносушарок не досягається температура охолодження передбачена інструкцією [1].

Не враховуючи конструктивні недоліки шахтних охолоджувачів з коробами, основною причиною незадовільного охолодження зерна є недостатня подача і відносно велика температура атмосферного повітря у збиральний період. Можливість інтенсифікації теплообміну збільшенням швидкості фільтрації повітря крізь шар зерна обмежена можливістю його виносу з коробів зовні.

Застосування охолоджувачів, які встановлюються окремо (виносні охолоджувачі) від сушарки і мають змогу працювати в самостійному режимі, має ряд переваг: покращується якість охолодження, збільшується продуктивність діючих зерносушарок за рахунок використання охолоджуючої частини в якості сушильної.

Аналіз різних варіантів охолодження зерна показує, що найбільш раціональним є охолодження зерна в рухомому щільному шарі з поперечною подачею охолоджуючого повітря та в режимі зваженого транспортування.

Разом з тим, в практиці зерносушіння вже використовуються охолоджувальні колонки безперервної дії із кільцевим гравітаційно-рухомим шаром зерна (зерносушарки типу СЗШ-16А та СЗСБ-8 обладнані охолоджувальними колонками типу «труба в трубі»). Робочий процес в таких колонках може бути реалізованим при різних швидкостях повітря і шару зерна. Недоліком використання виносних колонкових-охолоджувачів є необхідність додаткового транспортного засобу – норії для перезавантаження зерна від сушарки до колонки. Але якщо в якості транспортного засобу використовувати пневмотранспортний завантажувач ефективність охолоджувачів можна підвищити за рахунок відйому частини акумульованої зерном теплоти транспортуємим повітряним потоком. Перспективність такого варіанту процесу охолодження та його ефективність може бути визначена шляхом теоретичного аналізу, тому що експериментальних даних по інтенсивності теплообміну зерна з повітря в літературі достатньо, але питання пов'язані з розрахунком та вибором оптимальних конструктивних та режимних параметрів такого процесу вивчені недостатньо.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питаннями охолодження зерна після зерносушарок присвячені роботи відомих дослідників: Анісікіна В.І., Птіцина С.Д., Лур'є В.М., Блохіна П.В., Авдєєва О.В., Рабіновича Г.Д., Любошица П.Л., Фрегера Ю.Л. та інших результати яких проаналізовано в роботах Курганського О.Д. [2], Ханхасаєва Г.Ф.[4] та Анісікіна В.І. [3]. У роботах перелічених авторів на основі даних експериментальних досліджень визначені критеріальні рівняння які характеризують інтенсивність теплообміну і представлені у вигляді:

$$Nu = A \cdot Re^n; \quad (1)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – критерій Нусельта; $Re = \frac{d_e v}{\nu}$ – критерій Рейнольдса; d_e – еквівалентний діаметр; v – швидкість обтікання поверхні; α – коефіцієнт теплообміну; λ, ν – коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості повітря.

Коефіцієнти в рівняннях різними авторами визначені так: $A=0.055; 0.074; 0.083; n=0.74; 0.79; 1$, а для віброзвального шару $A=0.029, n=1.03$, для пневмозвального шару $A=1.6 \cdot 10^{-3}, n=0.95$.

Аналітичні дослідження впливу гідродинамічних режимів на інтенсивність тепло- і масообміну при охолодженні зерна в щільному шарі повітрям проведені в роботах [5-7]. Процеси охолодження зерна у вертикальних потоках досліджені в роботах [8,9,10], у режимі переміщення у щільному шарі [7], у віброцентровому шарі [13], у пневмозвальному шарі [11], в режимі пневмо гравітаційного переміщення [12], у гравітаційному переміщенні при перехресному русі повітря [14]. В проведених дослідженнях отримано аналітичні рівняння для розрахунків кінетичних закономірностей зміни температури зерна в часі. Розрахунком проведеним з використанням отриманих залежностей [15] визначено, що отримати нормоване перевищення температури зерна над температурою оточуючого середовища (5–10°C) в одному типу охолоджувача доволі складно, тому що значна питома витрата повітря зумовлює значні габарити установки.

Разом з тим, використовуючи можливості інтенсифікації різних варіантів організації процесу можна визначити певну раціональну конструкцію охолоджувача яка буде задовольняти вимогам інструкції [1]. Попередні дослідження [7-10] дозволяють рекомендувати зерноохолоджувач, що реалізує двостадійний процес: 1 етап – охолодження в режимі вертикального пневмотранспорту при

завантаженні, 2 етап – охолодження в колонково-гравітаційній установці з перехресної подачею повітря.

3. Мета дослідження

Мета роботи – аналітичне визначення параметрів процесу охолодження зерна після сушарок в комбінованому пневматично-колонковому охолоджувачі.

4. Виклад основного матеріалу

Особливістю запропонованої технологічної схеми реалізації процесу охолодження зерна після сушарок є проведення процесу в два етапи (дві стадії): короткочасне охолодження в режимі пневмотранспорту (при завантаженні колонкового охолоджувача) та наступного охолодження при перехресному русі потоків зерна (Рис. 1).

При пневматичному транспортуванні нагрітого зерна у вертикальному пневмоканалі має місце значна різниця швидкості повітря і зерна, тобто швидкість обтікання може досягати кількох метрів за секунду, що надає можливість значно інтенсифікувати зовнішній теплообмін і швидкість охолодження зерна. Крім того, оскільки, зерно охолоджується після конвективного сушіння і поверхня зерна є «перегрітою» відносно центру, то навіть короткочасний обдув зернівок холодним повітрям зменшує температуру поверхні інтенсифікуючи внутрішню теплопередачу.

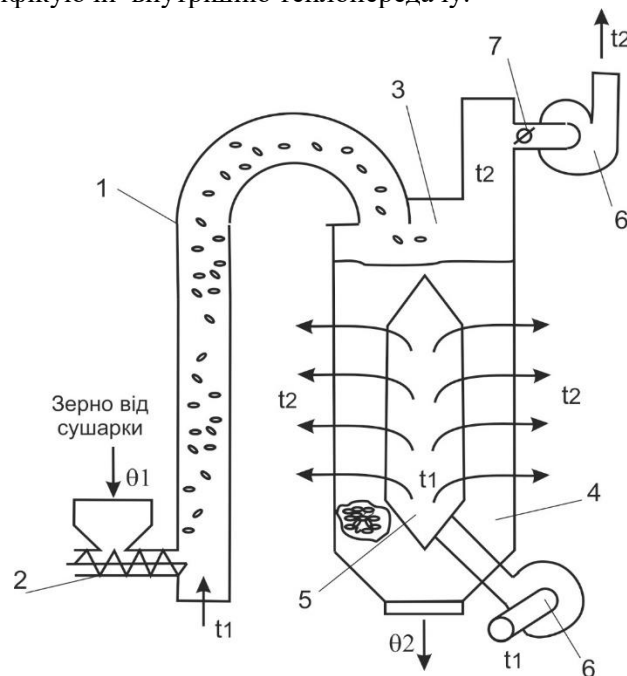


Рис. 1. Схема реалізації процесу охолодження зерна:

1 – пневмоканал, 2 – живильник завантажувач, 3 – осаджувальна камера, 4 – зернова колонка, 5 – повітророзподільник, 6 – вентилятор, 7 – регулятор витрат повітря

Розглянемо окремо обидві стадії охолодження зерна. Основним завданням при розрахунках процесу охолодження, є визначення рівняння залежності температури зерна від часу перебування в «камері» охолодження або від координати переміщення зернового матеріалу від завантаження до вивантаження з камери, для різних варіантів та режимів проведення процесу.

Рівняння кінетики охолодження є вихідним для знаходження часу необхідного для зниження температури зерна та визначення конструктивних параметрів охолоджуючих пристроїв та установок.

Для вирішення даної задачі можна використовувати різні диференціальні рівняння теплового балансу, теплообміну, динаміки переміщення зерна в елементах конструкції установок.

Для складання математичного опису використовуємо припущення які певною мірою ідеалізують досліджувані процеси:

- зерновий потік являє собою шар дисперсного матеріалу (елементи якого кулясті частинки з еквівалентним діаметром d_e), який характеризується порозністю ϵ та насипною щільністю ρ_n ;



- коефіцієнти опору, теплообміну та теплофізичні параметри зерна і охолоджуючого повітря, прийнятого постійними та середніми за час перебігу процесу;
- теплообмін потоків зерна та матеріалів з оточуючим середовищем не враховується (при наявності теплоізоляції).

Зміну температури кулястої частинки при охолодженні в повітряному середовищі в часі визначимо з розв'язку рівняння нестационарної теплопровідності [16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right); \quad (2)$$

при граничних умовах III роду: $\frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} (\theta - t_0) = 0$, де θ – температура зерна.

Для середньої (за радіусом кулі) температури розв'язок рівняння охолодження має вигляд:

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\mu_n^2 \frac{a}{R^2} \tau}; \quad (3)$$

де, $B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}$, a – коефіцієнт температуропровідності; λ – коефіцієнт теплопровідності;

$R = \frac{d_e}{2}$ – радіус зернівки; μ_n – корені характеристичного рівняння $\mu_n = (Bi - 1) \operatorname{tg} \mu_n$;

$Bi = \frac{\alpha d_e}{\lambda_3}$ – критерій Біо.

Оскільки, ряд в рівнянні (3) швидко сходиться, то можна обмежитися першим членом ряду [16] (і прийняти $B_n = B_1$, $\mu_n = \mu_1$).

Диференціюючи рівняння (3) і порівнюючи отримане рівняння з рівнянням (3) (виключаючи складові $B_1 e^{-\mu_1^2 \frac{a}{R^2} \tau}$) отримаємо рівняння:

$$-\frac{d\theta}{d\tau} = \mu_1^2 \frac{a}{R^2} (\theta - t); \quad (4)$$

де $\mu_1^2 \cong 3Bi$.

Величина критерію Біо залежить від інтенсивності теплообміну, що визначається величиною коефіцієнта теплообміну, значення якого можна визначити з критеріальних рівнянь [17]:

$$Nu = 0.175 Re_0^{0.75}; \quad (5)$$

для частинки зваженої в повітрі,

$$Nu = 0.074 Re_c^{0.74}; \quad (6)$$

для частинки в нерухомому фільтруємому шарі,

де, $Re_c = \frac{d_e v_{\phi}}{\nu}$ – критерій Рейнольдса; v_{ϕ} – швидкість повітря; u – швидкість частинки; $v_{\phi} = \frac{v_{\phi}}{\varepsilon}$ – швидкість фільтрації шару зерна (швидкість повітря на вільний перетин), d_e – ефективний діаметр каналу.

Таким чином критерій Біо в розгорнутому вигляді визначається формулою:

$$Bi = \frac{0.5 \lambda_{\phi}}{\lambda_3} A \left(\frac{d_e v_{\phi}}{\nu} \right)^n; \quad (7)$$

З аналізу якого випливає, що для одного виду зернового матеріалу, який характеризується розміром (середнім) зерна, або станом щільного фільтруємого шару зерна, що характеризується порозністю ($d_e = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon R}{1 - \varepsilon}$) величина Біо залежить в основному від гідродинамічного режиму взаємодії повітряного потоку із зерном.

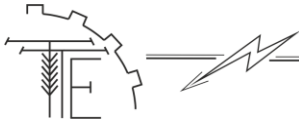
Для розрахунку кінетики охолодження зерна (при використанні рівня (4)) у вертикальному пневмопроводі необхідно знати швидкість обтікання частинки в процесі її переміщення повітряним потоком. Зважаючи на те, що швидкість повітря в пневмоканалі практично незмінна, то швидкість обтікання частинок буде залежати від швидкості її руху.

Швидкість руху матеріальної частинки (зернівки) у вертикальному висхідному потоці визначається диференціальним рівнянням яке можна використовувати в такому вигляді [18]:

$$m \frac{du}{d\tau} = \frac{g}{v_{\text{вит}}^2} [(v_{\phi} - u)^2 - v_{\text{вит}}^2]; \quad (8)$$

де, $u = \frac{ds}{d\tau}$ – швидкість частинки в пневмоканалі, $v_{\text{вит}}$ – швидкість витання, g – прискорення вільного падіння.

Розв'язок рівняння (8) за початкових умов: $t=0$, $u(0)=u_0$, $s=0$ відносно $u(\tau)$ та $s(\tau)$ (де s – відстань переміщення частинки, u – швидкість руху частинки) відомий [18]:



$$u = v_{\pi} - v_{\text{ВІТ}} \frac{k_0 \exp \frac{2g\tau}{v_{\text{ВІТ}}} - 1}{k_0 \exp \frac{2g\tau}{v_{\text{ВІТ}}} + 1}; \quad (9)$$

$$s = v_{\pi} \tau - v_{\text{ВІТ}} \left(\frac{v_{\text{ВІТ}}}{g} \ln \frac{k_0 \exp \frac{2g\tau}{v_{\text{ВІТ}}} + 1}{k_0 + 1} - \tau \right); \quad (10)$$

$$\text{де, } k_0 = \frac{v_{\text{ВІТ}} - u_0 + v_{\pi}}{v_{\text{ВІТ}} + u_0 - v_{\pi}}.$$

На рис.2. наведено графіки зміни швидкості частинки за шляхом переміщення (висоти пневмоканалу Н), отримані з рівнянь (9) і (10).

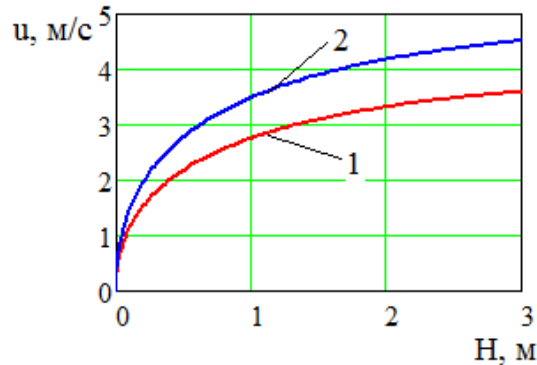


Рис. 2. Зміна швидкості частинки за висотою пневмоканалу
(1 – рівномірний повітряний потік $v_{\pi}=15$ м/с, 2 – рівномірний повітряний потік $v_{\pi}=16$ м/с.)

Враховуючи зміну відносної швидкості руху зернівки за часом та записавши критерій Біо як функцію відносної швидкості:

$$Bi(\tau) = 0.5 \cdot 0.175 \frac{\lambda_{\pi}}{\lambda_3} \left(\frac{d_e}{v} \right)^{0.75} (v_{\pi} - u(\tau))^n. \quad (7a)$$

Перепишемо рівняння (4) у вигляді:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = K (v_{\pi} - u(\tau))^{0.75} (t - \theta(\tau)); \quad (11)$$

$$\text{де, } K = \frac{a}{R^2} 0.268 \frac{\lambda_{\pi}}{\lambda_3} \left(\frac{d_e}{v} \right)^{0.75}.$$

Невизначену величину температури повітря в рівнянні (11) можна отримати з рівняння теплового балансу для потоків зерна і повітря:

$$c_{\pi} G_{\pi} dt = -c_3 G_3 d\theta; \quad (12)$$

вважаючи, що співвідношення $\frac{c_3}{c_{\pi}}$ не залежить від температури та інтегруючи від початкового значення температур t_1, θ_1 до довільного $t(\tau), \theta(\tau)$ матимемо:

$$t(\tau) = t_1 + R(\theta_1 - \theta(\tau)); \quad (13)$$

$$\text{де, } R = \frac{c_3 G_3}{c_{\pi} G_{\pi}}.$$

Таким чином, кінетика охолодження зерна у вертикальному пневмоканалі визначається розв'язками системи рівнянь (9), (11), (12).

Для наближеного (орієнтовного) розрахунку можна прийняти відносну швидкість руху зернівки у повітряному потоці як середнє значення. Тоді зміну температури зернівки у висхідному повітряному потоці можна визначити розв'язком рівнянь (11) та (13).

$$\theta(\tau) = A + (\theta_1 - A)e^{-K_0\tau}; \quad (14)$$

$$\text{де, } A = \frac{t_1 + R\theta_1}{R+1}; K_0 = (R+1) \cdot K \cdot \bar{v}_{\text{ср}}^{0.75}.$$

Аналіз розв'язків отриманих рівнянь показує, що наприклад, при висоті пневмоканалу $H = 2.5$ м (час перебування частинки в пневмоканалі 1-1.2 с, рис.3) та при температурі повітря $t_1 = 25^\circ\text{C}$ зерно після сушарки можна охолодити на 7-10 $^\circ\text{C}$, чого явно мало. Це зумовлено незначним часом перебування зерна в пневмоканалі $\tau = 1-1.5$ с, а за експериментальними даними $\tau \approx 1$ с.

Для збільшення часу перебування матеріалу у висхідному повітряному потоці та зменшення висоти пневмопроводу використовують пульсуючий рух газу [9,10, 19]. На рис.3. відображені залежності переміщення зерна за часом у пневмотрубі при рівномірному і пульсуючому повітряних потоках.

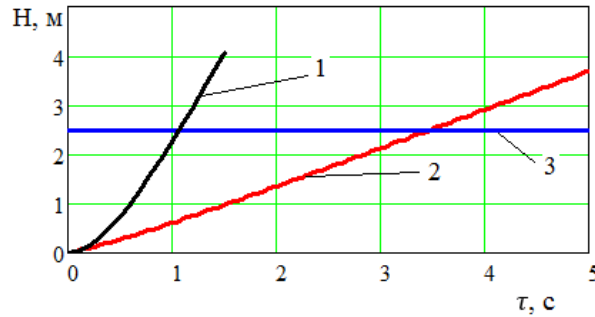


Рис. 3. Переміщення зерна за часом (1 – рівномірний повітряний потік $v_{\text{п}}=15$ м/с, 2 – пульсуючий повітряний потік $v_{\text{пmax}} = 19$ м/с, $f = 5$ Гц, 3 – задана висота пневмоканалу)

Розглянемо рух нагрітої зернівки у пульсуючому повітряному потоці. Обробка даних експериментальних досліджень процесу теплообміну між пульсуючим газовим потоком і зерновим матеріалом зваженим в ньому, дозволила апроксимувати отримані залежності зміни коефіцієнту теплообміну та часу перебування зернової зернового матеріалу пневмоканалі (висотою 2.3м) простими формулами [19]:

$$\tau = \tau_0(1 + 0.65\omega); \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{500 + 400\sqrt{\omega}}{\tau_0(1 + 0.65\omega)}; \quad (16)$$

$$v_{\text{п}}(\tau, \omega) = v_0(1 - \sin \omega\tau); \quad (17)$$

τ_0 – час перебування зерна в пневмопроводі без пульсацій, с; $\omega = 2\pi f$, f – частота пульсацій, Гц, α – коефіцієнт теплообміну, Вт/м²·°С.

Відносна швидкість переміщення зернівки u визначається з чисельного розв'язку рівняння (7) при підстановці в нього (16).

Аналіз отриманих даних показує, що в пульсуючому потоці повітря, тривалість перебування зернівок у пневмопроводі значно більша ніж при звичайному пневмотранспортуванні. Але і збільшення частоти пульсації коефіцієнт теплообміну значно зменшується, Рис.4.

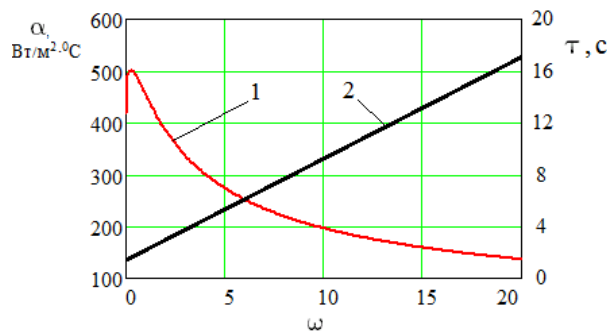


Рис.4. Залежність коефіцієнта теплообміну від частоти пульсацій – 1; залежність часу перебування у пневмотрубі від частоти пульсацій – 2.

Для виявлення доцільності та ефективності застосування пульсуючого повітряного потоку при охолодженні зерна в режимі пневмотранспорта проведено числовий експеримент. За базову математичну модель використана спрощена система рівнянь (7), (10), (16) сформульована у вигляді диференційного рівняння:

$$\frac{d\theta(\tau, \omega)}{d\tau} = \frac{6\lambda_{\text{в}}}{c_3 G_3 d_e^2} Nu(\tau, \omega)(t_1 + R\theta_1 - (R + 1)\theta(\tau, \omega)); \quad (18)$$

$$\text{де, } Nu(\tau, \omega) = 0.175 \left(\frac{d_e}{\nu} \right)^{0.75} (v_{\text{п}}(\tau, \omega) - u(\tau, \omega))^{0.75}.$$

Результати числових розрахунків представлені на Рис.5 і Рис.6.

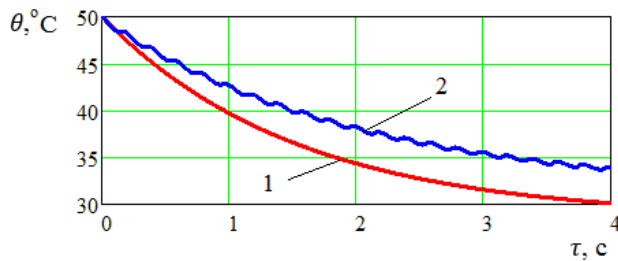


Рис.5. Кінетики охолодження зерна за часом (1 – рівномірний повітряний потік $v_{\text{п}}=15$ м/с, 2 – пульсуючий повітряний потік $v_{\text{пmax}}=19$ м/с, $f=5$ Гц)

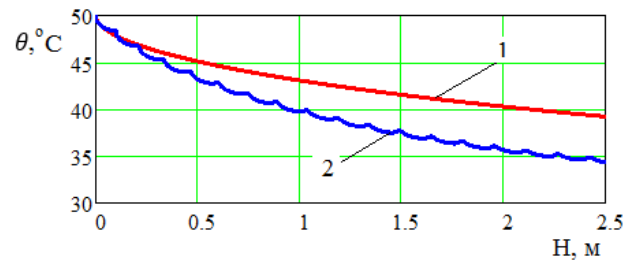


Рис.6. Кінетика охолодження зерна за висотою пневмопроводу (1 – рівномірний повітряний потік $v_{\text{п}}=15$ м/с, 2 – пульсуючий повітряний потік $v_{\text{пmax}}=19$ м/с, $f=5$ Гц)

Як можна побачити з Рис.5 використання пульсуючого повітряного потоку призводить до зменшення інтенсивності теплообміну між зерном і охолоджуючим повітрям і відповідно, до збільшення експозиції охолодження, але за рахунок зменшення швидкості проходження пневмоканалу Рис.3, температура зерна на виході з пневмоканалу зменшується, Рис.6.

5. Висновки

У процесі виконання роботи було зроблено такі висновки:

1. Сформульовані аналітичні математичні моделі дозволяють проводити розрахунок процесів переміщення і охолодження зерна в пневмоканалі з рівномірним і пульсуючим потоком повітря.
2. Використання пульсуючого повітряного потоку дозволяє більше (на ~35%) відняти теплоти з нагрітого зерна при його транспортуванні у пневмоканалі у порівнянні з рівномірним повітряним потоком.

Список використаних джерел

1. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, семян масличных культур и эксплуатации зерносушилок / Г. Н. Станкевич, О. И. Шаповаленко, Т. В. Страхова, Б. М. Петруня, А. И. Яковенко, М. В. Остапчук, А. Б. Шашкин. Одеса: «АРД-ЛТД», 1997. 72 с.
2. Курганський О. Д., Котов Б. І. Аналіз способів охолодження зернового матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 2(94). С. 49–52.
3. Анискин В. И., Рыбарук В. А. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием. ВИМ. М.: Колос, 1972. 200 с.
4. Ханхасаев П.Ф. Интенсификация процесса охлаждения путем повышения скорости обдува атмосферным воздухом. Автореферат дисс. канд. техн. наук Новосибирск 1988. 18с.
5. Котов Б.І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження): [колект. 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.
6. Грищенко В. О., Котов Б. І. Моделювання нестационарних процесів тепло-масообміну при охолодженні зерна в щільному шарі потоком повітря. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2017. Вип. 6. С. 87–96.
7. 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.
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. Інтенсифікація процесів нагріву і охолодження зерноматеріалів в установках типу пневмотруба. *Збірник матеріалів науково-практичної конференції «Іноваційні технології збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві»*, Ніжин, 2016. С.205–210.
10. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Курганський О. В. Математичне моделювання термообробки зерна у вертикальному пневмоканалі при періодичній зміні швидкості теплоносія за висотою. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. № 2. С. 76–80.
11. Котов Б. І., Курганський О. Д. Моделювання та розрахунок параметрів процесу охолодження зерна після сушарок в пневмостані. *Сільськогосподарські машини*. 2016. Вип. 34. С. 66–74.



12. Котов Б. І., Курганський О. О., Труханська О. О. Динаміка охолодження зерна в аероґравітаційному шарі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 3(98). С. 94–98.
13. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Курганський О. Д., Степаненко С. П., Швидя В. О. Теоретичні дослідження процесу охолодження зернового матеріалу при переміщенні у вібровідцентровому шарі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. Вип. 46. С. 54–60.
14. Калініченко Р. А., Котов Б. І. Математичне моделювання стаціонарних режимів установок для охолодження і нагріву дисперсних сільськогосподарських матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. Вип. 8. С. 97–104.
15. Котов Б.І., Солоня О.В., Курганський О.Д. Розрахунок режимів охолоджуючих пристроїв для зерносушарок. *Тези доповідей міжнародної наукової інтернет конференції*. Тернопіль, 2016. Вип.16. С.80–83.
16. Гинзбург А.С. Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.
17. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
18. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1976. 344 с.
19. Рабинович Г. Д., Слободич Г. Н. Экспериментальное исследование процесса теплообмена между пульсирующим газовым потоком и взвешенными в нем твердыми частицами. *Инженерно-физический журнал*. 1959. т. II. №9. С. 79–85.

References

- [1] Stankevich, G.N., Shapovalenko, O.I., Strakhova, T.V., Petrunya, B.M., Yakovenko, A.I., Ostapchuk, M.V., Shashkin, A.B. (1997). *Instruktsiya po sushke prodovol'stvennogo, kormovogo zerna, semyan maslichnykh kul'tur i ekspluatatsii zernosushilok* [Instruction for drying food, feed grain, oilseeds and operation of grain dryers]. Odesa: «ARD-LTD». [in Russian]
- [2] Kurhans'kyy, O. D., Kotov, B. I. (2016). Analiz sposobiv okholodzhennya zernovoho materialu [Analysis of methods of cooling grain material]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2(94). 49–52. [in Ukrainian]
- [3] Aniskin, V.I., Rybaruk, V. A. (1972). *Teoriya i tekhnologiya sushki i vremennoy konservatsii zerna aktivnym ventilirovaniyem* [Theory and technology of drying and temporary conservation of grain by active ventilation]. VIM. M.: Kolos, [in Russian]
- [4] Khankhasayev, P.F. (1988). *Intensifikatsiya protsessa okhlazhdeniya putem povysheniya skorosti obduva atmosfernym vozdukhom* [Intensification of the cooling process by increasing the speed of blowing with atmospheric air.]. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk Novosibirsk [in Russian]
- [5] Kotov, B.I. (2017). Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'yektakh pislyazbyral'noyi obrobky i zberihannya zerna (ochyshchennya, separatsiya, sushynnya, aktyvne ventilyuvannya, okholodzhennya) [Modeling of technological processes in typical objects of postharvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling)]: [kolekt. monohrafiya]. Nats. akad. ahrar. nauk Ukrayiny, Nats. nauk. tsentr "In-t mekhanizatsiyi ta elektryfikatsiyi sil. hosp-va". Kyiv ; Nizhyn : Lysenko M. M. [in Ukrainian]
- [6] Hryshchenko, V.O., Kotov, B. I. (2017). Modelyuvannya nestatsionarnykh protsesiv teplo-masoobminu pry okholodzhenni zerna v shchil'nomu shari potokom povitrya [Modeling of non-stationary processes of heat and mass transfer during cooling of grain in a dense layer by air flow]. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva*. 6. 87–96. [in Ukrainian]
- [7] Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kurhans'kyy, O. D. (2017). Teplo i masoobmin pry sushinni i okholodzhenni zernovoho materialu u shchil'nomu rukhomomu shari [Heat and mass transfer during drying and cooling of grain material in a dense moving layer]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APC*. 1(96). 93–95. [in Ukrainian]
- [8] Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kyfyak V. V. (2015). Modelyuvannya dynamiky nahrivu ta okholodzhennya zernoproduktiv v rezhymy pnevmotransportera [Modeling the dynamics of heating and cooling of grain products in the mode of pneumatic conveyor]. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya*. 1. 40–43. [in Ukrainian]
- [9] Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A., Kurhans'kyy, O.D. (2016). Intensyfikatsiya protsesiv nahrivu i okholodzhennya zernomaterialiv v ustanovkakh typu pnevmotruba [Intensification of heating and cooling processes of grain materials in pneumotube type installations]. *Zbirnyk materialiv naukovopraktychnoyi konferentsiyi «Inovatsiyni tekhnolohiyi zbalansovanoho pryrodokorystuvannya v ahropromyslovomu vyrobnytstvi»*, Nizhyn, 205–210. [in Ukrainian]
- [10] Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kurhans'kyy, O.V. (2016). Matematychnе modelyuvannya termooobrobky zerna u vertykal'nomu pnevmokanali pry periodychniy zmini shvydkosti teplonosiya za vysotoyu



- [Mathematical modeling of grain heat treatment in a vertical pneumatic channel with a periodic change in the speed of the coolant in height]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*. 2. 76–80. [in Ukrainian]
- [11] Kotov, B. I., Kurhansky, O. D. (2016). Modelyuvannya ta rozrakhunok parametriv protsesu okholodzhennya zerna pislya susharok v pnevmostani [Modeling and calculation of parameters of the cooling process of grain after dryers in the pneumatic plant]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny*. 34. 66–74. [in Ukrainian]
- [12] Kotov, B. I., Kurhansky O. D., Trukhans'ka O. O. (2017).bDynamika okholodzhennya zerna v aerohravitatsiynomu shari [Dynamics of grain cooling in the aerogravity layer]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APC*. 3(98). 94–98. [in Ukrainian]
- [13] Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kurhansky, O. D., Stepanenko, S. P., Shvydya, V. O. (2016). Teoretychni doslidzhennya protsesu okholodzhennya zernovoho materialu pry peremishchenni u vibrovidtsentrovomu shari [Theoretical studies of the cooling process of grain material during movement in the vibrocentric layer]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil's'kohospodars'kykh mashyn*. 46. 54–60. [in Ukrainian]
- [14] Kalinichenko, R. A., Kotov, B. I. (2018). Matematychnye modelyuvannya statsionarnykh rezhymiv ustanovok dlya okholodzhennya i nahiru dyspersnykh sil's'kohospodars'kykh materialiv [Mathematical modeling of stationary modes of installations for cooling and heating of dispersed agricultural materials]. *Mekhanizatsiya ta elektrifikatsiya sil's'koho hospodarstva*. 8. 97–104. [in Ukrainian]
- [15] Kotov, B.I., Solona, O.V., Kurhans'ky, O.D. (2016). Rozrakhunok rezhymiv okholodzhuyuchykh prystroyiv dlya zernosusharok [Calculation of modes of cooling devices for grain dryers]. *Tezy dopovidey mizhnarodnoyi naukovoï internet konferentsiyi. Ternopil'*, 16. 80–83. [in Ukrainian]
- [16] Ginzburg, A.S. (1985). *Raschot i proyektirovaniye sushil'nykh ustanovok pishchevoy promyshlennosti* [Calculation and design of drying plants for the food industry]. M.: Agropromizdat. [in Russian]
- [17] Lykov, A.V. (1967). *Teoriya teploprovodnosti* [Heat conduction theory]. M.: Vysshaya shkola, [in Russian]
- [18] Zuyev, F.G. (1976). *Pnevmaticheskoye transportirovaniye na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh* [Pneumatic transportation at grain processing plants]. M.: Kolos. [in Russian]
- [19] Rabinovich, G.D., Slobodich, G.N. (1959). Eksperimental'noye issledovaniye protsesa teploobmena mezhd pul'siruyushchim gazovym potokom i vzveshennymi v nem tverdymi chastitsami [Experimental study of the heat exchange process between a pulsating gas flow and solid particles suspended in it]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2(9). 79–85. [in Russian]

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗЕРНА ПОСЛЕ СУШКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ

Одно из основных требований к зерносушилкам – необходимость качественного охлаждения зернового материала после сушки. На сегодня наиболее широкое распространение получили охладители зерна встроенных в зерносушилки. Как показала практика эксплуатации, получившие наибольшее распространение в сельском хозяйстве шахтные зерносушилки с их охлаждающими зонами являются малоэффективными: температура зерна после охлаждения часто превышает температуру окружающего воздуха на 15-30⁰С, что недопустимо. Устройствам с коробами присущи такие недостатки, как неравномерность воздуха распределения в объеме зерновой массы и соответствующая неравномерность температурного поля охлаждающего воздуха, ограниченные возможности интенсификации теплообмена в процессе охлаждения зерна.

Более перспективными для сельскохозяйственных зерносушилок являются выносные охладители, которые устанавливаются отдельно от сушилки и могут работать в самостоятельном режиме, что имеет ряд преимуществ: улучшается качество охлаждения, увеличивается производительность действующих зерносушилок за счет использования охлаждающей части в качестве сушильной.

Основными недостатками использования существующих выносных колонковых-охладителей: необходимость дополнительного транспортного средства - нории для перезагрузки зерна от сушилки к колонке; вертикальная компоновка, приходится применять транспортирующие средства для зерна для подачи на значительную высоту. Но если в качестве транспортного средства использовать пневмотранспортной загрузчик с пульсирующим потоком воздуха, то эффективность охладителей можно повысить за счет отъема части аккумулированной зерном теплоты транспортирующим воздушным потоком.

В работе предложено аналитическое обоснование повышения эффективности охладителей с пневмотранспортным перемещением в пульсирующем потоке воздуха

Ключевые слова: охлаждение зерна, математическая модель, воздушный поток, выносные колонковые охладители.

Ф. 18. Рис. 6. Лит. 19.

**INCREASE THE EFFICIENCY OF GRAIN COOLING AFTER DRYING AND HEAT TREATMENT**

One of the main requirements for grain dryers is the need for high-quality cooling of grain material after drying. Today, the most widespread are grain coolers built into grain dryers. As the practice of operation has shown, the most widespread in agriculture mine grain dryers with their cooling zones are ineffective: the temperature of the grain after cooling often exceeds the ambient air temperature by 15-30 °C, which is unacceptable. Devices with boxes have such disadvantages as uneven distribution air in the volume of grain mass and the corresponding uneven temperature field of the cooling air, limited opportunities for intensifying heat transfer during grain cooling.

More promising for agricultural grain dryers are external coolers, which are installed separately from the dryer and can operate in an independent mode, which has a number of advantages: the quality of cooling improves, the productivity of existing grain dryers increases due to the use of the cooling part as a dryer.

The main disadvantages of using the existing external column coolers: the need for an additional vehicle - a bucket elevator for reloading grain from the dryer to the column; vertical arrangement, it is necessary to use transporting means for grain for feeding to a considerable height. But if a pneumatic transport loader with a pulsating air flow is used as a vehicle, then the efficiency of the coolers can be increased due to the removal of a part of the heat accumulated by the grain by the transporting air flow.

The paper proposes an analytical rationale for increasing the efficiency of coolers with pneumatic transport in a pulsating air flow.

Key words: grain cooling, mathematical model, air flow, remote column coolers.

F. 18. Fig. 6. Ref. 19.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Котов Борис Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32316, e-mail: rkalinichenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>)

Калініченко Роман Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут» (вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл. 16600, e-mail: rkalinichenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9325-1551>).

Рудь Анатолій Володимирович – кандидат технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32316, e-mail: anatoliyrudj@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7206-7103>).

Грушецький Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6434-1213>).

Котов Борис Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры агроинженерии и системотехники Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Хмельницкая обл., 32316, e-mail: rkalinichenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>).

Калиниченко Роман Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики ОП НУБіП Украины «Нежинский агротехнический институт» (ул. Шевченко, 10, г. Нежин, Черниговская обл. 16600, e-mail: rkalinichenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9325-1551>).

Рудь Анатолій Владимирович – кандидат технических наук, профессор кафедры агроинженерии и системотехники Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Хмельницкая обл., 32316, e-mail: anatoliyrudj@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7206-7103>).

Грушецкий Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры агроинженерии и системотехники Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Хмельницкая обл., 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6434-1213>).

Borys Kotov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering, State Agrarian and Engineering University in Podilia (St. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilsky, Khmelnytsky region, 32316, e-mail: rkalinichenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>).

Roman Kalinichenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics Separated subdivision of NUBiP of Ukraine «Nizhyn Agrotechnical Institute» (Shevchenko St., 10, Nizhyn, Chernihiv region 16600, e-mail: rkalinichenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9325-1551>).

Anatoliy Rud – Agroengineering and system technology department State Agrarian and Engineering University in Podilia (St. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilsky, Khmelnytsky region, 32316, e-mail: anatoliyrudj@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7206-7103>).

Sergiy Hrushetskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering and System Engineering State Agrarian and Engineering University in Podilia (St. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilsky, Khmelnytsky region, 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6434-1213>).