

**АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ****Курганський Олександр Дмитрович** аспірант

Національний університет біоресурсів та природокористування України

Котов Борис Іванович д.т.н., професор

Вінницький національний аграрний університет

Kurganskyi O.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Kotov B.

Vinnitsa National Agrarian University

Анотація: проведено теоретичний аналіз процесу охолодження зерна при різній інтенсивності відведення теплоти охолоджуючим повітрям.

Ключові слова: зерно, теплообмін, повітря, охолодження.

Постановка проблеми

В зв'язку з впровадженням високоінтенсивних технологій, технічного обладнання і прогресивних методів збирання та доставки зернопродуктів до місця, переробки і зберігання виникають певні труднощі, пов'язані із забезпеченням збереження значної кількості сирого і вологого зерна у короткі строки. Для попередження псування зернової маси підвищеної вологості наразі із сушінням (досить енергоємний процес) і активним вентиляванням застосовують охолодження зерна, в тому числі і штучно охолодженим повітрям. При цьому зменшується небезпека псування зерна, забезпечується безперервне приймання зерна, підвищується ефективність використання сушильного обладнання в зв'язку із збільшенням періоду його експлуатації. Що стосується кормового зерна, то доцільність його зберігання в охолодженому стані (без затрат на термічне сушіння) потребує додаткових досліджень.

Для охолодження зерна застосовують стаціонарні і пересувні холодильні установки [1,2]. Оскільки компресорні холодильні установки мають значні енергетичні затрати (потужність установки при її продуктивності по консервації 20т/год становить 250кВт), то виникає нагальна потреба інтенсифікації процесу охолодження зерна.

Аналіз останніх досліджень

В роботах [1–5] виявлено значну різноманітність способів і технічних засобів відведення теплоти (самозігрівання або переданої в зерносушарках) від зерноматеріалу в залежності завдання охолодження.

Необхідність охолодження зерна визначається двома напрямками технологій післязбиральної доробки зерноматеріалів:

– охолодження свіжозібраного зерна штучно охолодженим повітрям для зниження його температури дозволяє загальмувати інтенсивність фізіолого-біохімічних, мікробіологічних процесів і активну життєдіяльність шкідників хлібних запасів [1];

– охолодження зерна після сушіння передбачено агротехнічними (вихідними) вимогами до зерносушильних агрегатів і комплексів [2,5].

В першому випадку охолодження проводять безпосередньо в силосах елеваторів або вентиляюємих бункерах продуванням нерухомого шару зернової маси, що потребує значних затрат енергії на транспорт холодного повітря.

Охолодження зерна в зерносушильних комплексах відбувається у виносних охолоджувальних установках (колонки, обертальні барабанами, установки кип'ячого шару) або шахтних, які є продовженням сушильної частини шатних сушарок.

Аналіз схем сушильних агрегатів [5] показав, що енергоємність і матеріалоємність охолоджуєвального обладнання в агрегатах досягає 43 і 40%.

Впровадження прогресивних технологій охолодження зерна з одночасним його транспортуванням в одному технологічному потоці без додаткових транспортуючих засобів може забезпечити значне здешевлення і зменшення енерговитрат процесів післязбиральної обробки зерна в цілому і тому набуває важливого значення.

Мета досліджень

Мета роботи – проведення аналізу існуючих способів відведення теплоти від зерноматеріалів і виявлення найбільш ефективного і технологічного доцільного способу охолодження зерна.

**Результати досліджень**

Розглядається процес охолодження одиничної зернини у формі сферичного тіла (куля) радіуса R з рівномірним початковим розподілом температури. Диференціальне рівняння теплопровідності для кулі може бути записано у вигляді [6]:

$$\frac{d}{d\tau} = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} \right) \quad (1)$$

при початкових умовах: $\tau=0$, $\Theta=\Theta_0$, для $0 \leq r \leq R$ і умови симетрії задачі в центрі кулі при $r=0$

$$\left(\frac{d}{dr} \right)_{r=0} = 0 \quad (2)$$

При задані граничних умов які характеризують спосіб відводу теплоти враховувались такі посилення. Кондуктивний теплообмін (граничні умови першого роду) малоефективний, так як зернина може мати тільки точковий контакт з охолоджуючою поверхнею; відведення теплоти тепловим потоком шляхом випромінювання (гранична умова другого роду) також практично не реалізуєма так, як неможливо забезпечити одного опромінювання всієї поверхні; і тільки конвективний спосіб передачі теплоти від зернини до охолоджуючого носія може бути ефективним, так як має різні способи реалізації (фільтруємий шар зерна, режим пневмотранспорту, тощо).

Розв'язок рівняння (1) при граничних умовах третього роду:

$$-\frac{d(R_1\tau)}{dr} - \frac{\alpha}{\lambda} [t_c - (R_1\tau)] = 0 \quad (3)$$

відповідно до [7] має вигляд:

$$\frac{(R_1\tau) - t_c}{0 - t_c} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha}{R^2} \tau} \quad (4)$$

де $A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi-1)^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi}$; μ_n – корені характеристичного рівняння; $tg \mu = -\frac{\mu}{Bi-1}$; $Bi = \frac{\alpha}{\lambda} R$ – критерій БІО; α – коефіцієнт теплообміну; λ – коефіцієнт теплопровідності речовини зернини, R – радіус зернини (якщо зернина за формою значно відрізняється від кулі використовують значення $R = 0,5 d_s$, де d_s – еквівалентний діаметр тіла) \square – коефіцієнт теплопровідності; r – координата за радіусом; τ – час.

Рівняння (4) дає можливість визначити розподіл температури всередині кулі в будь який момент часу.

Але для аналізу практичного використання доцільно знати зміну в часі середньооб'ємної температури матеріалу яка визначається очевидним рівністю:

$$\bar{\theta}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \theta(r, \tau) dz$$

Після інтегрування рівняння (4) матимемо:

$$\frac{\bar{\theta}(\tau) - t_c}{0 - t_c} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha}{R^2} \tau} \quad (5)$$

де B_n – сталі коефіцієнти, що визначаються [7] із співвідношення:

$$B_n = \frac{GBi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}$$

Швидкість охолодження зернини визначимо диференціюванням рівняння (6) за часом, прийнявши тільки один член ряду (так як швидко сходиться [6, 7]), тобто розглядається стадія регулярного режиму:

$$\bar{\theta}(\tau) = t_c + (0 - t_c) B_1 e^{-\mu_1^2 \frac{\alpha}{R^2} \tau} \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = -\frac{\alpha}{R^2} \mu_1^2 B_1 (0 - t_c) e^{-\mu_1^2 \frac{\alpha}{R^2} \tau} \quad (7)$$

Визначив із рівняння (6) величину B_1 , і підставивши її значення в рівняння (7) матимемо:

$$-\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} = \mu_1^2 \frac{\alpha}{R^2} (\bar{\theta} - t_c) \quad (8)$$

Величина кореня μ_1 досить точно апроксимується двома членами ряду Тейлора, які можна замінити більш простим виразом:



$$ctg\mu_1 = -\frac{B_1-1}{\mu_1} = \frac{1}{\mu_1} - \frac{\mu_1}{3} - \dots; \mu_1^2 = 3Bi.$$

Тоді рівняння (8) можна переписати у вигляді $-\frac{d\bar{r}}{d\tau} = 3Bi \frac{\alpha}{R^2} \Delta T$ або розкриваючи значення Bi і $\alpha = \frac{\lambda}{cs}$:

$$-\frac{d\bar{r}}{d\tau} = \frac{3\alpha}{Rcp} \Delta T, \quad (9)$$

де $\Delta T = \theta - t_c$.

Із геометричних співвідношень для кулі: об'єм $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, поверхня $F = \pi R^2$, величина $\frac{3}{R} = \frac{F}{V}$. Підставляючи отримані значення в (9) з урахуванням що $m = V \cdot s$, матимемо:

$$-m\bar{c} \frac{d\bar{r}}{d\tau} = 2F(\bar{\theta} - t_c) \quad (10)$$

Інтегруючи рівняння (10) при початкових умовах $\tau=0, \bar{\theta}=\bar{\theta}_0$ матимемо:

$$\tau = \frac{mc}{2F} \ln \frac{\bar{\theta}_0 - t_c}{\bar{\theta} - t_c} \quad (11)$$

Рівняння (11) визначає час охолодження зернини в повітряному середовищі з постійною температурою t_c . Оскільки величини маси m , поверхні F і питомої теплоємності c , є величинами незалежними від режиму охолодження, то інтенсивність охолодження буде визначатися умовами теплообміну, тобто величиною коефіцієнту теплообміну α .

Розглянемо вплив режиму відведення теплоти на інтенсивність охолодження зерна.

При обробці зерна атмосферним повітрям в малорухомих і нерухомих шарах [4] інтенсивність теплообміну при гідродинамічних режимах $Re = 80 \dots 700$ характеризується критеріальною залежністю:

$$Nu = 0.055 Re^{0.79}$$

де $Nu = \frac{\alpha 2R}{\lambda_v}$ - критерій Нусельта, $Re = \frac{2Rv}{\nu}$ - критерій Рейнольдса, v - швидкість

обтікання зернини повітрям, ν - кінематична в'язкість повітря, λ_v - теплопровідність повітря, $2R$ - приведений розмір зернівки.

Охолодження зерноматеріалу у віброзрідженому шарі при фільтрації охолоджуючого повітря в режимах [5] $Re = 275 - 955$ характеризується критеріальною залежністю у вигляді:

$$Nu = 0.029 Re^{1.02}$$

Можливість інтенсифікації теплообміну за рахунок підвищення швидкості обтікання потоком повітря до 1.4м/с при обробці в кип'ячому шарі при $Re = 200 - 900$ показана в [3]. Критеріальне рівняння подане у вигляді:

$$Nu = 0.62 Re^{0.5}$$

Як можна визначити із відомих залежностей інтенсивності теплообміну від швидкості обдуву зернини можливості подальшого підвищення коефіцієнта тепловіддачі далеко не вичерпані.

При швидкостях повітряного потоку близьких або, що перевищують критичні значення коефіцієнт теплообміну може досягати значних величин; так для режимів $Re = 10 \dots 10^5$ багатьма дослідниками отримані критеріальні залежності від $Nu = 0.143 Re^{0.67}$ до $Nu = 1.06 Re^{0.46}$.

На основі узагальнення відомих досліджень була визначена осереднена критеріальна залежність для чисел Рейнольдса в інтервалі $10^3 - 10^4$:

$$Nu = 2 + A Re^m Pr^n \quad (12)$$

де $A=0.5, m=0.56, n=0.33$.

Розкриваючи значення критеріїв Nu, Re, Pr будемо мати:

$$\alpha = A \frac{\lambda}{d_p^{1-m}} \frac{c^m \nu^{n-m} \rho^m}{a^n}$$

Величина $Nu = 2$ при $Re = 0$ відповідає значенню α при природній конвекції і в подальшому не враховується.

Максимальне значення коефіцієнту теплообміну досягається збільшенням відносної



швидкості охолоджуючого повітря ϑ . Максимальні відносні швидкості можуть бути досягнуті в режимі пневмотранспорту зерна, в кільцевому вихорному шарі (циклонні пристрої) та переміщення матеріалу механічними побудниками.

Вплив властивостей охолоджуючого повітря або газу на величину α неоднозначний. Так із зменшенням температури величина ρ підвищується, а величина λ , V , α зменшується. Розкриваючи значення коефіцієнта теплопровідності $\alpha = \lambda / c \rho$ перепишемо рівняння у вигляді:

$$\alpha = \lambda^{m-n} d_e^{1-m} g^m V^{n-m} \rho^m c^n A \quad (13)$$

Величина теплоємності C і теплопровідності повітря λ залежить від його вологовмісту і вологості:

$$C = C_0 + C_n X, \lambda = \lambda_0 + 4.1 \cdot 10^{-3} \varphi$$

де x, φ – вологовміст і відносна вологість повітря.

Таким чином, з аналізу формули (13) випливає, що збільшення вологості охолоджуючого повітря збільшує інтенсивність теплообміну, і само видалення вологи з нагрітого зерна при його охолодженні підвищує ефективність процесу.

В результаті теоретичних дослідів випливає, що при інтенсивних гідродинамічних режимах обробки зерна холодним повітрям $Re > 10^4$ коефіцієнт теплообміну може бути збільшений до 300–350 Вт/м²°С.

Висновки

Отримані аналітичні формули для визначення швидкості і експозиції охолодження одиничних зерен в залежності від режимних і теплофізичних параметрів охолоджуючого повітря.

Визначено, що основним режимним параметром, що найбільш впливає на час охолодження є швидкість обтікання зернини повітрям.

Список літератури

1. Вобликов Е.М. *Технология хранения зерна* / Е.М. Вобликов. М.: Лань. 2003. – 448 с.
2. Станкевич Г.Н. *Техника и технология использования искусственно охлажденного воздуха в процес се хранения зерна* / Г.Н. Станкевич, Б.Н. Петруня // *Хранение и переработка зерна*. 2003. №3 с. 52-53
3. Ханхасаев П.Ф. *Интенсификация процесса охлаждения путем повышения скорости обдува атмосферным воздухом. Автореферат дисс. канд. техн. наук Новосибирск 1988. – 18с.*
4. Поплевин О.П. *Обоснование параметров холодильной машины для временной консервации влажных семян зерновых культур. Автореферат дисс. канд. техн. наук М.: 1984 - 18 с.*
5. Авдеев А.В. *Изыскание и исследование рациональных охладителей для зерносушилок с-х типа. Автореферат дисс. канд. техн. наук М.: 1975. - 20 с.*
6. Исаченко В.П. *Теплопередача* / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел / М.: Энергия – 488 с.
7. Лыков А.В. *Теория теплопроводности* / А.В. Лыков. Москва.: 1967. - 600 с.

References

1. Voblikov Ye.M. *Tekhnologiya khraneniya zerna* / Ye.M. Voblikov. M.: Lan'. 2003. 448.s.
2. Stankevich G.N. *Tekhnika i tekhnologiya ispol'zovaniya iskusstvenno okhlazhdennom vozdukh v protsess eto khraneniya zerna* / G.N. Stankevich, B.N. Petrunya // *Khraneniye i pererobotki zerna*. 2003. №3 s. 52-53
3. Khankhasayev P.F. *Intensifikatsiya protsessa okhlazhdeniya putem povysheniya skorosti obduva atmosferym vozdukhom. Rabota diss. kand. tekhn. nauk Novosibirsk 1988 - 18s.*
4. Poplevin A.P. *Obosnovaniye parametrov kholodil'noy mashiny dlya vremennoy konservatsii vlazhnykh semyan zernovykh kul'tur. Rabota diss. kand. tekhn. nauk M.: 1984 - 18 s.*
5. Avdeyev A.V. *Izyskaniye i issledovaniye ratsional'nykh okhladiteley dlya zernosushilok s-kh tipa. Rabota diss. kand. tekhn. nauk M.: 1975 - 20 s.*
6. Isachenko V.P. *Teplotperedacha* / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukhomel / M.: Energiya - 488 s.
7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* / A.V. Lykov. Moskva.: 1967. - 600 s.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА

Аннотація: проведено теоретический анализ процесса охлаждения зерна при разной интенсивности отвода теплоты охлаждающим воздухом.

Ключевые слова: нагрев зерна, теплообмен, воздух, охлаждения.

THE ANALYSIS OF THE GRAIN MATERIAL COOLING WAYS

Summary: the theoretical analysis of process of cooling of grain is carried out at different intensity of tap of warmth by chilling air.

Keywords: grain heating, heat exchange, air, cooling.