

УДК 633.52.631

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ НАСИПУ ЗЕРНОВОЇ МАСИ ПРИ ЗБЕРІГАННІ В ЗЕРНОСКЛАДАХ ТА СИЛОСАХ

Котов Б.І.¹, Калініченко Р.А.², Спирін А.В.³

¹ д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет;

² к.т.н., доцент, Національний університет біоресурсів і

природокористування України;

³ к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет.

Розроблена аналітична математична модель процесів охолодження і нагріву у товстому нерухомому шарі зернового матеріалу.

Математична модель, охолодження, нагрівання, активне вентилування.

Постановка проблеми. Незалежно від типу сховища існує три способи (режими) зберігання зерна: тривале в сухому стані, при вологості (13-14%) зерна нижче критичного значення; короткочасне – при охолодженні зерна атмосферним або штучно охолодженим повітрям; без доступу повітря (кисню) в герметизованому сховищі.

Перший режим ґрунтується на тому, що інтенсивність дихання, виділення вологи і теплоти сухої зернової маси вкрай низька, що гальмує або робить неможливим розвиток мікроорганізмів.

Режим зберігання в охолодженому стані ґрунтується на тому, що при температурі 6-10 °С інтенсивність дихання значно зменшується, багато мікроорганізмів і шкідників перестають розмножуватися. Тимчасове консервування зерна холодом, обумовлено нерівномірністю потрапляння свіжозібраного зерна на післязбиральну доробку, різними сортовими ознаками і призначенням зерна (формування партій зерна однакової стиглості).

Режим зберігання зерна без доступу повітря ґрунтується на тому, що в герметичному сховищі, внаслідок дихання зернової маси, споживається кисень і накопичується вуглекислий газ, що призводить до загибелі аеробної мікрофлори.

При будь-якому способі зберігання в зерновій масі може існувати явище підвищення температури (певного осередка-джерела,

підвищеної вологості насіння шкідників або активованого зерна) внаслідок перебігу в ній фізіологічних і теплофізичних процесів (передача теплоти ззовні).

Інтенсифікація фізіологічних процесів (випадання конденсату з повітря в міжзерновому просторі) призводить до виникнення явища самозігрівання – довільне збільшення температури зернової маси до 50-60 °С, що призводить до псування зерна. При відсутності цього явища підвищення температури зернової маси зумовлюється передачею теплоти від оточуючого середовища через огороження (стінку) від атмосферного повітря – температура якого змінюється внаслідок добових і сезонних коливань, а також під дією сонячної радіації.

При підвищенні температури зерна приймають технологічні заходи для ліквідації (нейтралізації) джерел самозігрівання шляхом аерації зовнішнім повітрям або механічним перемішуванням в процесі перевантаження (перемішування зерна транспортними засобами).

Для визначення динаміки розвитку нестаціонарних температурних градієнтів в зерновій масі (насипу зерна) в сховищі, а також прогнозування температурного режиму і визначення моменту вмикання апаратури системи вентилявання або перемішування зерна, необхідно встановити закономірності зміни температури зерна за часом і координатою при зберіганні в сховищах різного типу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Загальна теорія процесів тепломасообміну узагальнена і розвинута О.В.Ликовим. Аналітичні розв'язки системи рівнянь тепло- і масо переносу отримані для тіл класичної форми. Аналітичні рішення таких рівнянь для частинок матеріалу в шарі, де процеси відбуваються при змінному режимі досі не отримано.[1] Тому при рішенні прикладних задач для сушіння в щільному шарі використовують спрощений механізм тепло-масообміну [2,3] і наближені розв'язки динаміки процесу [4,5]. В роботі [4] досліджується модель сушіння тільки як масообмінного процесу, в [5] враховується тепловиділення мікробіологічних процесів у зерні якщо постійне джерело теплоти зосереджене в масиві матеріалу. В роботі [6] показано вплив розподіленості потужності джерела тепловиділення за висотою, але задача вирішується для сталого режиму при відсутності вентилявання. Вплив розподіленості джерела і щільності матеріалу на процес сушіння залишається поза увагою.

Мета дослідження. Отримати аналітичні залежності для аналізу теплових процесів у зерновому насипу при зберіганні в прямокутних зерноскладах і циліндричних силосах.

Результати дослідження. Методи дослідження теплообміну зернової маси з оточуючим середовищем при наявності джерел тепловиділення засновані на рішенні класичного рівняння теплопровідності Фур'є для твердих необмежених (одномірних) і обмежених дво- і трьохвимірних.

В теперішній час основні типи зерносклади мають форму циліндра або прямокутника. В останньому випадку насип зерна можемо розглядати як паралелепіпед, що утворений перетинанням трьох взаємно перпендикулярних необмежених пластин кінцевої товщини. Застосовуючи відомий метод теорії теплопровідності [7,8] – теорему про перемноження рішень (розв'язків), можна для твердого пористого тіла у формі паралелепіпеду подати (представити) рішення як добуток безрозмірних температур (що змінюються в часі і за координатою x, y, z) для трьох необмежених пластин:

$$\theta = \theta_x \cdot \theta_y \cdot \theta_z$$

$$\text{де } \theta_x, \theta_y, \theta_z = \frac{T(\tau(x, y, z)) - T_0}{T_c - T_0};$$

$T(\tau), T_0, T_c$ – температура тіла поточна, початкова і зовнішнього повітря;

x, y, z – координати; τ – час.

Для насипу зерна у формі кінцевого циліндра температурне поле визначається добутком безрозмірних температури для нескінченного круглого циліндра і необмеженої пластини:

$$\theta = \theta_r \cdot \theta_x.$$

Температурне поле необмеженої пластини у нестационарному режимі при дії внутрішнього джерела (рівномірно розподіленого за координатою) і теплообміном із оточуючим середовищем за законом Ньютона температура якого більша за початкову температуру тіла може бути описана [8] рівнянням теплопровідності у вигляді:

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a_e \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{W_0}{c \cdot \rho}; \quad \tau > 0; -R < x < +R \quad (1)$$

при початкових і граничних умовах (граничні умови III роду):

$$\theta(x, 0) = f(x) = \theta_0 = \text{const} \quad (2)$$

$$-\lambda_e \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial x} + \alpha(t_c - \theta(R, \tau)) = 0 \quad (3)$$

$$\text{умова симетрії: } \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

де $a_e = \frac{c \cdot \rho}{\lambda_e}$ – коефіцієнт температуропровідності, ефективний;

λ_e – коефіцієнт теплопровідності ефективний, що враховує дисперсність матеріалу і внутрішні конвективні потоки (природна циркуляція); c – питома теплоємність, ρ – щільність зернової маси; W_0 – питома потужність внутрішнього тепловиділення; θ , t_c – температура тіла і оточуючого середовища.

Температурне поле необмеженого циліндра при дії внутрішнього джерела теплоти і теплообміном із зовнішнім середовищем за законом Ньютона може бути описано відомим рівнянням:

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a_e \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial r^2} \right) + \frac{W_0}{c \cdot \rho}; \quad (5)$$

при початкових і граничних умовах (граничні умови III роду):

$$\theta(r, 0) = f(r) = \theta_0 = \text{const} \quad (5a)$$

$$-\lambda_e \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial r} + \alpha(t_c - \theta(R, \tau)) = 0 \quad (5б)$$

$$\frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \theta(0, \tau) \neq \infty \quad (5в)$$

де R – радіус циліндра;

θ_0 – початкова температура.

При $W=0$, рівняння (1-5) описують температурне поле в нестационарному режимі при розігріві тіла рослинної маси під дією зовнішнього середовища.

Перехідні процеси в насипу зернової маси в режимі розігріву можна описати функціональною залежністю температури в будь-якій точці (за товщиною пластини або за радіусом циліндра) отриманого розв'язком рівнянь (1)-(5) [8].

Для насипу у формі пластини рівняння перехідного процесу розігріву має вигляд:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 - (t_c - t_0) \left[1 + \frac{Po_e}{2} \left(1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{2}{Bi_e} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po_e}{\mu_n^2} \right) A_n \cos \frac{x}{R} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a}{R^2} \tau \right) \right] \quad (6)$$

де $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$ – сталий коефіцієнт;

$\mu = Bi_e \text{ctg} \mu$ – корінь характеристичного рівняння.

Для насипу у формі циліндра (нескінченного):

$$\theta(r, \tau) = \theta_0 - (t_c - t_0) \left[1 + \frac{Po_e}{4} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} + \frac{2}{Bi_e} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po_e}{\mu_n^2} \right) A_n' I_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a}{R^2} \tau \right) \right] \quad (7)$$

$$\text{де } A_n' = \frac{2Bi_e}{(\mu_n^2 + Bi_e^2) I_0(\mu_n)}; \quad \mu = Bi_e \frac{I_0(\mu)}{I_1(\mu)};$$

$$Po = \frac{W_0 R^2}{\lambda_e (t_c - \theta_0)} - \text{критерій Померанцева.}$$

Величини коренів характеристичних рівнянь $\mu(Bi)$ і $\mu'(Bi)$ наведена в таблицях [8].

При відсутності джерела самозігрівання $W_0=0$ зміна температури зерна відбувається за рахунок теплопритоків від атмосферного повітря за граничних умов III роду. В рівнянні (6), (7) $P_0=0$.

Так перехідна функція насипу зерно продукту у формі циліндра Рис.1. висотою $2L$ і діаметром $2R$ у режимі розігріву $t_c > \theta_0$ відповідно до [8] може бути отримана перемноженням розділів відносних температур нескінченного циліндра (7) і необмеженої пластини (6).

$$\frac{t_c - \theta(r, x, \tau)}{t_c - \theta_0} = \frac{t_c - \theta(r, \tau)}{t_c - \theta_0} \times \frac{t_c - \theta(x, \tau)}{t_c - \theta_0}$$

або в розгорнутому вигляді:

$$\theta(r, x, \tau) = t_c - (t_c - \theta_0) \sum \sum A_n' A_m'' I_0 \left(\mu_n' \frac{r}{R} \right) \cos \mu_m'' \frac{x}{L} \exp \left[- \left(\frac{\mu_n'^2}{R^2} + \frac{\mu_m''^2}{R^2} \right) a \tau \right] \quad (8)$$

$$\text{де } A_n' = \frac{2Bi_1}{(\mu_n'^2 + Bi_1^2) I_0(\mu_n')}; \quad A_m'' = (-1)^{m+1} \frac{2Bi_2 \sqrt{Bi_2^2 + \mu_m''^2}}{\mu_m'' (Bi_2^2 + Bi_2 + \mu_m''^2)};$$

де μ_n', μ_m'' – корені відповідних характеристичних рівнянь (для циліндра і пластини).

Ряди в рівнянні (8) швидко сходяться, тому для наближених розрахунків можна обмежитись одним першим членом ряду. Числові значення коренів характеристичних рівнянь в залежності від критерію Біо подані в [8].

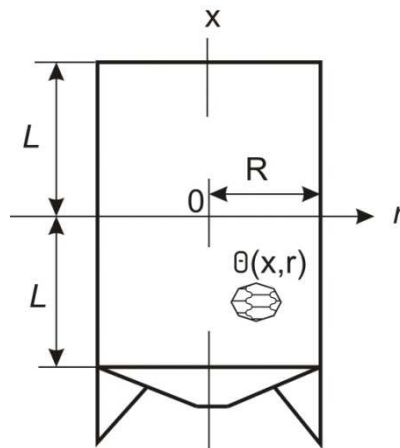


Рис.1. Сховище у вигляді обмеженого циліндра і його розрахункова схема.

Висновки. Розглянуті аналітичні математичні моделі процесів нагріву і охолодження зернового матеріалу в сховищах прямокутної і циліндричної форми дозволяють прогнозувати динамічний розвиток температурних полів насипу зерна в залежності від визначальних параметрів (температур повітря і зерна, кількості подачі повітря).

Список літератури

1. Гапонюк О.І. Активне вентилявання та сушіння зерна. / навчальний посібник / О.І Гапонюк, М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич, І.І. Гапонюк. – Одеса: Поліграф, 2014. – 324 с.
2. Анискин В.И. К расчету продолжительности сушки зерна при вентилировании неподогретым воздухом / В.И.Анискин, В.М.Лурье // Научно-технический бюллетень ВИМ. М.: 1982. Вып.51. –С.26-29.
- 3.Пятрушявичус В.И. Активное вентилирование травяных кормов / В.И.Пятрушявичус, В.М.Любарский Л.: Агропромиздат, 1986. –96с.
4. Котов Б.І. Математична модель динаміки сушіння листостеблових матеріалів активним вентиляванням /Б.І.Котов. В.Ф.Кузьменко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. –2013.–№13. –Т.№.–С.32-38.
5. Котов Б.І. Аналітичне дослідження тепломасопереносу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна /Б.І.Котов, Р.А.Калініченко // Науковий вісник НУБІП України. –2011. –№166. ч.4. –С.138-147.

Котов Б.І., Калініченко Р.А., Спирін А.В.

Аналітичне моделювання динаміки теплового режиму насипу зернової маси при зберіганні в зерноскладах та силосах

6.Котов Б.І. Технологічні та теплоенергетичні основи підвищення ефективності сушіння рослинної сировини /Б.І.Котов. Автореф. дис. докт. тех. наук. Глеваха –1994. –40с.

7. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. –488 с.

8. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

Kotov B. I.

Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa, Ukraine

Kalinichenko R.A

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kiev, Ukraine*

Spirin A.V.

Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa, Ukraine