

**ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ТА ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

УДК 633.52.631

**ТЕПЛО- І МАСООБМІН ПРИ СУШІННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ У ЩІЛЬНОМУ НЕРУХОМОМУ ШАРІ***Котов Борис Іванович* д.т.н., професор*Спирін Анатолій Володимирович* к.т.н., доцент*Вінницький національний аграрний університет**Калініченко Роман Андрійович* к.т.н., доцент*Національний університет біоресурсів і природокористування України**Kotov B.**Spirin A.**Vinnitsa National Agrarian University**Kalinichenko R.**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

Анотація: розроблена аналітична математична модель процесів нагріву і сушіння рослинних матеріалів у товстому нерухомому шарі щільність якого змінюється за висотою.

Ключові слова: математична модель, сушіння, нагрівання, активне вентилявання.

Постановка проблеми

Сушіння сільськогосподарських матеріалів і продуктів один із основних процесів агропромислового виробництва. Сушінню підлягають трави (сіно), зерно, льняний ворох, насінневий ворох кормових культур та ін. Для сушіння таких продуктів, а також продуктів, що традиційно висушуються в теплових сушарках, можна використовувати активне (примусове) вентилявання атмосферним або підігрітим повітрям за місцем зберігання, або у спеціально обладнаних установках платформеного типу. Порівняльна оцінка діючих і нових технологічних схем сушіння рослинного матеріалу утруднена відсутністю аналітичного опису рослинної (листо-стеблевої) маси в щільному шарі, придатного для рішення інженерних задач.

Особливістю сушіння листо-стеблевої маси активним вентиляванням є неоднорідність щільності за висотою шару і, відповідно, розподілу тепловиділень, які потрібно враховувати в розрахунках часу сушіння.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Загальна теорія перенесення теплоти і речовини стосовно процесу сушіння 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 розподілених потужностей джерела тепловиділення за висотою, але задача вирішується для сталого режиму при відсутності вентилявання. Вплив розподілених джерел і щільності матеріалу на процес сушіння залишається поза увагою.

Мета дослідження

Отримати спрощені аналітичні залежності для аналізу процесу сушіння рослинної сировини з урахуванням змінної щільності матеріалу за висотою і відповідно дії джерела самозігрівання.

Результати дослідження

Сушіння рослинного матеріалу, (наприклад трави або насінневого вороху) відбувається у нерухомому шарі постійної висоти фільтруванням нагрітого повітря з нижньою подачею. Щільність шару матеріалу, відповідно до [3,6], нелінійно зменшується за висотою. Початок координат приймемо на рівні повітророзподільної решітки. Визначимо зміну параметрів повітря і матеріалу в часі і за координатою (визначимо поля температури і вологовмісту матеріалу як функції часу і координати).

Для рішення цієї задачі використаємо спрощене припущення механізму



тепловологопереносу роботи [5], а також апроксимуємо розподіл щільності матеріалу за висотою експоненціальною залежністю:

$$\rho_m = \rho_1 e^{-px}, \quad (1)$$

де, ρ_1 – щільність матеріалу із самого низу штабеля, x – координата, p – коефіцієнт зміни щільності.

Запишемо систему диференціальних рівнянь в частинних похідних які описують баланс теплоти і маси та умови тепло- і масообміну.

$$q_0 + \alpha\sigma(t - \theta) = c_z \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - r_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (2)$$

$$\alpha m_0 e^{-px} \sigma(\theta - t) = G_v c_p \frac{dt}{dx} H \quad (3)$$

$$-\frac{dU}{d\tau} = k(U - bd) \quad (4)$$

$$-m_0 e^{-px} \frac{\partial U}{\partial \tau} = G_v H \frac{\partial d}{\partial x} \quad (5)$$

де θ , t – температура зерна і повітря; U , d – вологовміст зерна і повітря; c_z , c_p , r_0 – питома теплоємність зерна, повітря і теплота пароутворення; α , k – коефіцієнти теплообміну і сушіння; q_0 – питома теплота самозигрівання; σ – питома поверхня матеріалу; H – висота шару матеріалу; $m_0 = V \cdot \rho_1$ питома маса матеріалу шару на самій решітці (V , ρ_1 – об'єм і щільність матеріалу на решітці).

Оскільки система рівнянь (2)-(5) строгого аналітичного розв'язку немає, скористаємося наближеним методом [5].

Інтегруючи рівняння (4) за початкових умов ($\tau=0$, $U=U_0$), матимемо:

$$U(\tau) = bd + (U_0 - bd)e^{-k\tau} \quad (6)$$

Візьмемо похідну $U(\tau)$ по τ і підставимо її значення в рівняння (5), після перетворень матимемо:

$$m_0 k (U_0 - bd) e^{-k\tau} = \frac{G_v H}{e^{-px}} \frac{dd}{dx} \quad (7)$$

Розділяючи змінні і інтегруючи отримане рівняння за початкових умов: $x=0$; $d(0)=d_1$, d_1 – вологовміст повітря на вході в шар матимемо:

$$d(x, \tau) = \frac{U_0}{b} - \left(\frac{U_0}{b} - d_1 \right) \exp\left(b \frac{A(\tau)}{p} (e^{-px} - 1) \right) \quad (8)$$

$$\text{де } A(\tau) = \frac{m_0 k}{G_v H} e^{-k\tau}.$$

Підставляючи значення $d(x, \tau)$ з (8) в рівняння (6) отримаємо рівняння. Що описує зміну вологовмісту матеріалу в часі і за координатою:

$$U(x, \tau) = bd(x, \tau) + (U_0 - bd(x, \tau))e^{-k\tau} \quad (9)$$

В рівнянні (2), використовуючи значення критерію Ребіндера $Rb = \frac{cd\theta}{rdU}$ зробимо заміну

$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\frac{r_0 Rb}{c_z} \frac{\partial U}{\partial \tau}$ і після перетворень матимемо:

$$q_0 + \alpha\sigma(t - \theta) = -r_0 (Rb + 1) \frac{dU}{d\tau} \quad (10)$$

Підставимо $\alpha\sigma(t - \theta)$ із (3) та $\frac{dU}{d\tau}$ із (5) в рівняння (10):

$$q_0 - \frac{G_v c_p H}{m_0 e^{-px}} \frac{\partial t}{\partial x} = r_0 (1 + Rb) \frac{G_v H}{m_0 e^{-px}} \frac{\partial d}{\partial x} \quad (11)$$

Значення градієнта вологовмісту повітря $\frac{\partial d}{\partial x}$ визначимо з рівняння (8):

$$\frac{dd}{dx} = A(\tau) e^{-px} \left(\frac{U_0}{b} - d_1 \right) \exp\left(\frac{A(\tau)b}{p} (e^{-px} - 1) \right) \quad (12)$$

Порівнюючи рівняння (11) і (12) після перетворень отримаємо рівняння зміни температури



повітря:

$$B_1 e^{-px} + B_2 \exp\left(\frac{A(\tau)b}{p}(e^{-px} - 1) - px\right) = c_p \frac{dt}{dx} \quad (13)$$

де $B_1 = q_0 \frac{m_0}{G_v H}$; $B_2 = r_0 (1 + Rb) A(\tau) \left(\frac{U_0}{b} - d_1\right)$.

Інтегруючи рівняння (13) за умови $x=0$; $t=t_1$, (де t_1 – температура повітря на вході в шар) отримуємо:

$$t(x, \tau) = t_1 + \frac{B_1}{pc_p} (1 - e^{-px}) + \frac{B_2}{A(\tau)bc_p} \left(1 - \exp\left(\frac{A(\tau)b}{p}(e^{-px} - 1)\right)\right) \quad (14)$$

Отримане рівняння визначає зміну температури повітря за висотою шару і в часі. Використовуючи критерій Ребіндера перетворимо рівняння (2) до вигляду:

$$q_0 + \alpha \sigma (t - \theta) = C_2 \frac{d\theta}{d\tau} \quad (15)$$

де, $C_2 = c_z \left(1 + \frac{1}{Rb}\right)$

Порівнюючи рівняння (15) і (3) запишемо:

$$q_0 - \frac{G_v c_p H}{m_0 e^{-px}} \frac{\partial t}{\partial x} = C_2 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (16)$$

Визначаючи похідну $\frac{\partial t}{\partial x}$ з рівняння (14) і підставляючи отримане значення в рівняння (16) після відповідних перетворень матимемо:

$$q_0 - \frac{G_v H}{m_0} B_1 - \frac{G_v H B_2}{m_0} \exp\left(\frac{A(\tau)b}{p}(e^{-px} - 1)\right) = C_2 \frac{d\theta}{d\tau} \quad (17)$$

Зробимо позначення:

$$B_3 = q_0 - \frac{G_v H}{m_0} B_1; \quad B_4 = \frac{G_v H B_2}{m_0}; \quad B_5(x) = \frac{b}{p}(e^{-px} - 1) \frac{m_0 k}{G_v H}$$

Перепишемо (17) у вигляді:

$$B_3 - B_4 \exp(B_5 e^{-k\tau}) = C_2 \frac{d\theta}{d\tau} \quad (18)$$

Розкладемо функцію $e^{-k\tau}$ в ряд і обмежимося першими двома членами:

$$e^{-k\tau} = 1 - k\tau + \frac{\tau^2 k^2}{2} - \frac{\tau^3 k^3}{3} \dots \quad (19)$$

Розв'язок рівняння (18) при початкових умовах $\tau = 0$, $\theta(0) = \theta_1$ із урахуванням (19):

$$\theta(\tau, x) = \theta_1 + \frac{B_3 \tau}{C_2} + \frac{B_4 \exp(B_5(x)(1 - k\tau)) - \exp(B_5(x))}{B_5(x) C_2 k} \quad (20)$$

На Рис. 1. і Рис. 2. представлені графічні інтерпретації зміни вологовмісту матеріалу в часі і за висотою шару, що розраховані за залежністю (9).

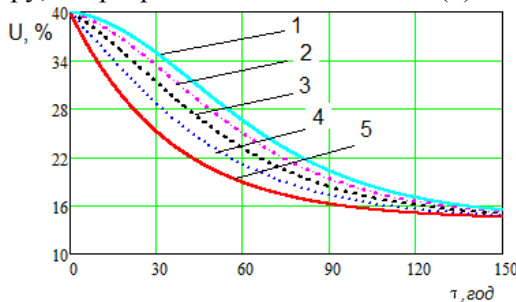


Рис. 1. Залежність експозиції сушіння матеріалу від товщини шару і питомих витрат повітря ($L=100 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{м}$; $1-h=0.02\text{м}$; $2-h=1\text{ м}$; $3-h=2\text{ м}$; $4-h=3\text{ м}$; $5-h=4\text{м}$)

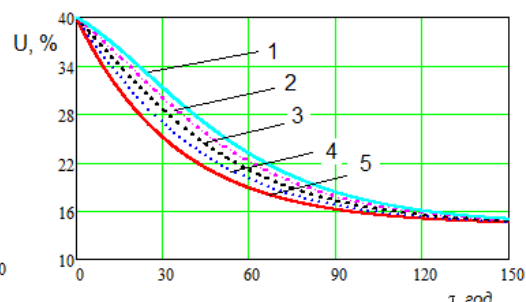


Рис. 2. Залежність експозиції сушіння матеріалу від товщини шару і питомих витрат повітря ($L=200 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{м}$; $1-h=0.02\text{м}$; $2-h=1\text{ м}$; $3-h=2\text{ м}$; $4-h=3\text{ м}$; $5-h=4\text{м}$)



Висновки

1. Отримані результати теоретичних досліджень тепло- і масообміну при сушінні рослинних матеріалів у товстому шарі створюють реальні науково-прикладні засади для розробки нових і удосконалення існуючих раціональних режимів роботи обладнання для сушіння листостеблових матеріалів активним вентиляванням.

2. Аналіз виведених аналітичних залежностей сушіння товстого шару матеріалу, щільність якого змінюється за висотою, дає можливість визначити шляхи і методи покращення ефективності процесу сушіння.

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. Пятрушыавичус В.И. Активное вентилирование травяных кормов / В.И. Пятрушыавичус, В.М. Любарский Л.: Агрпромиздат, 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. Калдініченко // Науковий вісник НУБІП України. –2011. –№166. ч.4. –С.138-147.
6. Котов Б.І. Технологічні та теплоенергетичні основи підвищення ефективності сушіння рослинної сировини / Б.І. Котов. Автореф. дис. докт. тех. наук. Глевах –1994. –40с.

References

1. Gaponyuk O.I. Aktyvne ventilyuvannya ta sushynnya zerna. / Navchalnyiy posibnik / O.I. Gaponyuk, M.V. Ostapchuk, G.M. Stankevich, I.I. Gaponyuk. - Odessa: Poligraf, 2014. - 324 s.
2. Aniskin V.I. K raschetu prodolzhitel'nosti sushki zerna pri ventilirovanii nepodogretym vozduhom / V.I. Aniskin, V.M. Lurye // Nauchno-technical byulleten WIM. M. : 1982. Vyp.51. -S.26-29.
3. Pyatrushyavichus V.I. Aktivnoe ventilirovanie travyanyh kormov / V.I. Pyatrushyavichus, V.M. Lyubarskiy L. : Agropromizdat, 1986. -96s.
4. Kotov B.I. Matematichna model dinamiki sushinnya listostebloviy materialiv aktyvnym ventilyuvannyam / B.I. Kotov. V.F. Kuzmenko // Pratsi Tavriyskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universitetu. -2013.-№13. -T. №.-S.32-38.
5. Kotov B.I. Analitichne doslidzhennya teplomasoperenosu v tovtstomu shari materialu pry dvostadiynomu protsesi sushynnya zerna / B.I. Kotov, R.A.Kaldinichenko // Naukoviy visnik NUBIP Ukrainy. -2011. -№166. ch.4. -S.138-147.
6. Kotov B.I. Tehnologichni ta teploenergetichni osnovy pidvyshchennya efektyvnosti sushynnya roslynnoi syrovyny / B.I. Kotov. Avtoref. dis. doctora. teh. nauk. Glevaha -1994. -40S.

ТЕПЛО- И МАССОБМЕН ПРИ СУШКЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОТНОМ НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Аннотация: разработана аналитическая математическая модель процессов нагрева и сушки растительных материалов в толстом неподвижном слое плотность которого меняется по высоте.

Ключевые слова: математическая модель, сушка, нагрев, активное вентилярование.

HEAT AND MASS TRANSFER IN DRYING AGRICULTURAL PLANT MATERIAL IN DENSE FIXED BED

Summary: developed the analytical mathematical model of heating and drying plant material in the large fixed bed density of which varies in height.

Keywords: the mathematical model, drying, heating, active ventilation.