

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ З ПЕРЕХРЕСНИМ
РУХОМ ЗЕРНА І СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ПРИ ЙОГО
СЕКЦІЙОВАНОМУ ВВОДІ**

Калініченко Р.А., к.т.н., доцент

(ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»)

Швидя В.О., к.т.н., с.н.с., Степаненко С.П., к.т.н., с.н.с.

(Національний науковий центр «ІМЕСГ»)

Котов Б.І., д.т.н., професор

(Подільський державний аграрно-технічний університет)

В статті розглянуто процеси тепло- і масообміну в процесі сушіння зерна у вертикальних колонках з перехресним рухом сушильного агента при його послідовній подачі в кожну секцію. Побудовано математичну модель процесу і адаптовано її в розрахункову форму модифікованої чарункової моделі повного перемішування сушильного агента і повного витиснення матеріалу в напрямку його руху.

Постановка проблеми. Сушіння зерна є одним із найбільш енергоємних процесів агропромислового виробництва. За останні роки енергоресурси значно подорожчали і мають тенденцію до подальшого зростання їх вартості. Сушильний парк зерно продукуючих господарств складають метало ємні і енергоємні сушарки шахтного типу з газорозподільчими коробами продуктивністю 20-50 т/год. Більш перспективні для малих об'ємів виробництва зерна у господарствах сушарки колонкового типу продуктивністю 5-10 т/год в Україні не виробляються. Тому розробка нових і удосконалених технологій та сушильного обладнання спрямованих на зниження затрат палива і електроенергії на висушування зернових матеріалів є важливою і актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема визначення закономірностей тепло масообміну в процесах сушіння зернових матеріалів при конвективному підведенні теплоти і досі повністю не визначена, про що свідчить значна кількість публікацій стосовно теоретичних посилань і моделювання сушильних процесів в узагальнюючому вигляді [1-4] і для конкретних умов сушильного процесу в установках різного типу [5-9]. В роботі [2] визначено напрямки підвищення ефективності сушильних установок, серед яких – багатократне використання сушильного агента. Аналіз теоретичних посилань щодо математичного опису процесу сушіння викладено в роботах [3-5] і в яких обґрунтовані переваги сушіння зерна в щільному шарі при фільтрації сушильного агента. Питання математичного моделювання процесів сушіння в щільному шарі достатньо повно висвітлено в публікаціях [7-13]. В

узагальнюючій роботі [7] показано, що процеси тепло масообміну в рухомому шарі зерна при перехресному русі, можуть бути описані рівняннями для фільтраційного сушіння в нерухомому шарі. Для опису ускладнених процесів з перехресним рухом матеріалу і теплоносія (сушильного агента) основним інструментом моделювання є зональний метод розрахунку [9, 11, 13] на основі чарункової схеми (моделі). В роботі [11] наведено математична модель і метод розрахунку параметрів процесу сушіння в елементарному шарі, який найбільше підходить для реалізації математичної моделі при складному (позонному) русі сушильного агента. Але для дослідження нових конструктивних схем зерносушарок колонкового типу необхідно створювати математичні моделі для конкретної схеми взаємодії зерна із сушильним агентом.

Мета роботи. Створення і дослідження математичної моделі стаціонарного режиму роботи колонкової сушарки при подачі сушильного агента за секціями.

Результати дослідження. Розглядається сушіння зернового матеріалу в процесі гравітаційного переміщення між двома перфорованими поверхнями через які нормально до вектору швидкості руху матеріалу подається сушильний агент. Сушильний канал розділено на декілька зон (як мінімум дві) через які послідовно (багатократно) фільтрується сушильний агент (Рис.1).

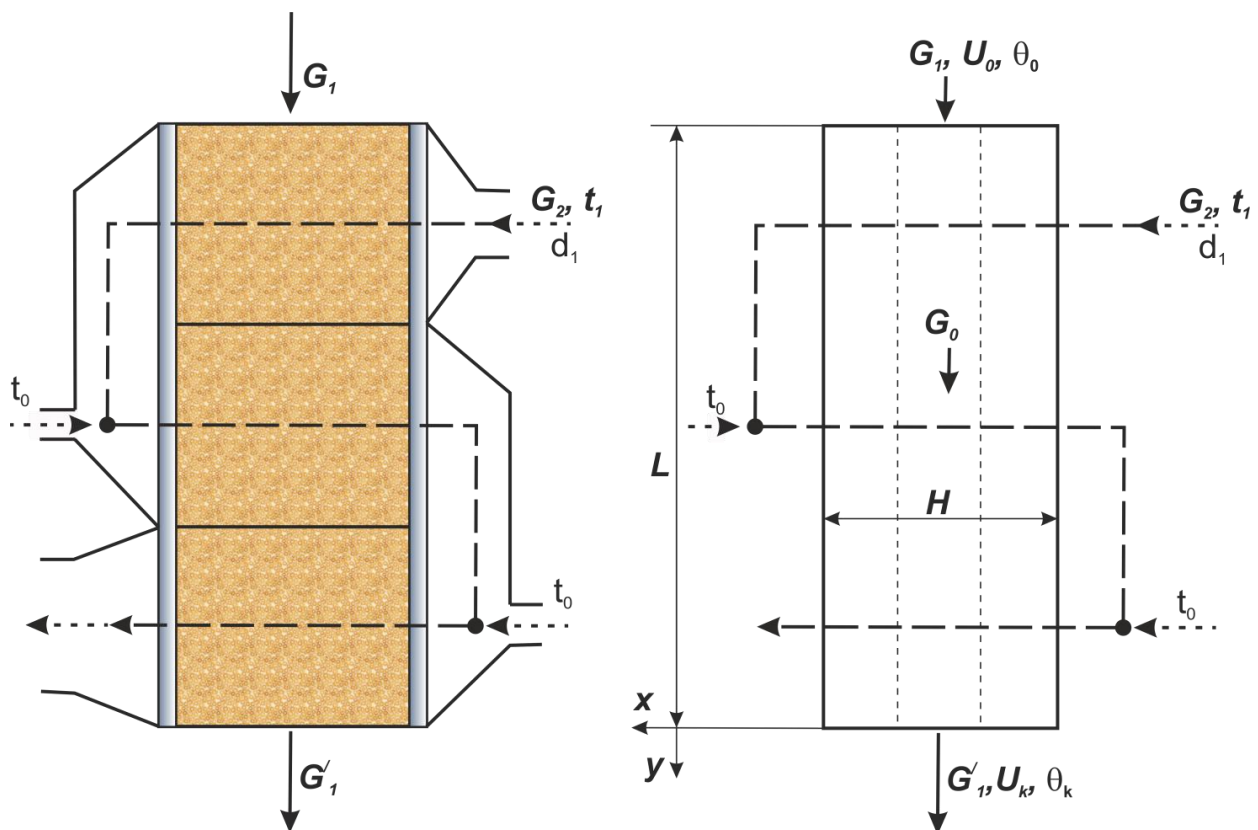


Рис.1 – Схема потоків у колонковій сушарці

Таким чином процес відбувається в перехресному режимі руху потоків.

Стационарний процес тепло-і масообміну, що реалізується за схемою протитечії може бути описано наступною системою рівнянь теплового [10] і матеріального балансу [8]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = B \cdot (t - \theta); \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = A \cdot (\theta - t); \quad (2)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial y} = C \cdot (a_1 \theta + c_1 - b_1 d); \quad (3)$$

$$\frac{\partial d}{\partial y} = D \cdot (a_1 \theta + c_1 - b_1 d). \quad (4)$$

де: $A = \frac{\alpha \cdot f}{C_2 G_2 H}; \quad B = \frac{\alpha \cdot f}{C_1' G_1 L}; \quad C_1' = C_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{Rb}\right); \quad Rb = \frac{c \cdot d\theta}{r \cdot dU}; \quad C = \beta \cdot f \cdot \frac{P_A}{P \cdot G_0 \cdot L};$

$D = \beta \cdot f \cdot \frac{P_A}{P \cdot G_2 \cdot H};$ θ, U – температура і вологовміст матеріалу; t, d –

температура і вологовміст сушильного агента; G_1, G_0, G_2 – масові витрати вологого і абсолютно сухого матеріалу та сушильного агента; C_1, C_2 – питома теплоємність матеріалу і сушильного агента; r – питома теплота пароутворення; f – поверхня зерна; α, β – коефіцієнти теплообміну і масообміну; L, H – висота і ширина шару зерна; a_1, c_1, b_1 – коефіцієнти лінійної апроксимації залежності парціального тиску пари $P(\theta, d)$ від параметрів матеріалу і середовища.

Оскільки, аналітичний розв'язок системи рівнянь (1-4) практично неможливий то використаємо для подальших досліджень зональний метод [16] і чарункову форму розв'язку рівнянь, вважаючи «чарункою» елементарний шар матеріалу. За елементарний шар зерна, прийнято шар товщиною Δx температуру якого в напрямку руху сушильного агента можна вважати незмінною, що дорівнює середньому значенню за висотою шару $\bar{\theta}_x$. Використовуючи очевидні співвідношення теплового балансу:

$$G_2 C_2 (t_1 - t_2) = \alpha f (t - \bar{\theta}_x) = \alpha f \Delta T_{in}; \quad (5)$$

і визначення коефіцієнта охолодження [11]:

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - \bar{\theta}_x} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha f}{G_2 C_2}\right), \quad (6)$$

де: t_1, t_2 – температура сушильного агента на вході і виході елементарного шару, ΔT_{ln} – середньо логарифмічна різниця температури сушильного агента і матеріалу. Запишемо рівняння (1) для елементарного шару:

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = k_1 \cdot (t - \theta), \quad (7)$$

де: $k_1 = \frac{\alpha \cdot f}{C_1' G_1 L \eta}$.

З рівняння матеріального балансу:

$$G_2(d - d_1) = G_0(U_1 - U), \quad (8)$$

матимемо:

$$U = \frac{G_2}{G_0} d_1 + U_1 - \frac{G_2}{G_0} d, \quad (9)$$

диференціюючи по y отримаємо:

$$-\frac{dU}{dy} = \frac{G_2}{G_0} \frac{dd}{dy}. \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (4) за граничної умови при $\theta = \bar{\theta}_x, x=0; d=d_1$ – вологовміст сушильного агента на вході в шар:

$$d = k_4 \bar{\theta}_x + d_1 \cdot e^{-k_3 x} + k_5, \quad (11)$$

де: $k_4 = a_1 \cdot (1 - e^{-k_3 x}); k_5 = c_1 \cdot (1 - e^{-k_3 x}); k_3 = D = \beta \cdot f \cdot \frac{P_A}{P \cdot G_2 \cdot H}$,

диференціюючи d за y матимемо:

$$\frac{dd}{dy} = k_4 \frac{d\bar{\theta}}{dy}. \quad (12)$$

Розв'язуючи рівняння (7) за граничної умови $y=0; \bar{\theta}_x = \theta_0$, отримаємо:

$$\bar{\theta}(y) = t_1 - (t_1 - \theta_0) \cdot e^{-k_1 y}, \quad (13)$$

а диференціюючи отримане рівняння за y матимемо:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = k_1 \cdot (t_1 - \theta_0) \cdot e^{-k_1 y}. \quad (14)$$

З рівняння (10), (12) і (14) визначимо рівняння кінетики сушіння елементарного шару матеріалу (розподіл вологовмісту матеріалу в напрямку руху):

$$\frac{dU}{dy} = k_1 k_4 \frac{G_2}{G_0} (t_1 - \theta_0) \cdot e^{-k_1 y}. \quad (15)$$

При певних складнощах у визначенні величин $\beta \cdot f$, кінетику зміни вологовмісту можна визначити з рівняння О.В.Ликова [14]:

$$\frac{dU}{dy} = k(t) \cdot (U - U_p) = \frac{k(t)}{v} \frac{dU}{dy} (U - U_p), \quad (16)$$

де: v – швидкість переміщення зерна.

Розв'язки рівнянь (15) і (16) за початкової умови: $y=0$; $U=U_0$ матимуть відповідно такий вигляд:

$$U(y) = U_0 - \frac{G_2}{G_0} k_4 (t_1 - \theta_0) (1 - \exp(-k_1 y)), \quad (17)$$

$$U(y) = U_p + (U_0 - U_p) \exp(-k(t) \cdot y) \quad (18)$$

В рівнянні (18) величина $k(t)$ визначається залежністю отриманою за даними експериментів для елементарного шару [14]:

$$k(t) = 5,55 \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^2 - 0,796 \frac{t}{100} \quad (19)$$

Розв'язок рівняння (2) при $x=0$; $t=t_1$, отримаємо у вигляді:

$$t(x) = t_1 - (t_1 - \bar{\theta}) \exp(-A \cdot x); \quad (20)$$

за умови $x=H$ рівняння (20) визначає температуру сушильного агента на виході температурного шару:

$$t_2(y) = t_1 - (t_1 - \theta(y)) \exp(-k_2); \quad (21)$$

де: $k_2 = \frac{\alpha \cdot f}{C_2 G_2}$, або із співвідношення (6):

$$t_2 = (1 - \eta) \cdot t_1 - \eta \cdot \bar{\theta}_0(y) \quad (22)$$

Вологовміст сушильного агента на виході із шару визначимо із рівняння (9):

$$d_2(y) = d_1 + \frac{G_0}{G_2} U_1 + \frac{G_0}{G_2} U(y). \quad (23)$$

Таким чином, математичну модель процесів тепло- і масообміну при сушінні зерна в елементарному шарі визначають рівняння (13), (21), (18) і (23), а схема розрахунків параметрів показана на рис.2.

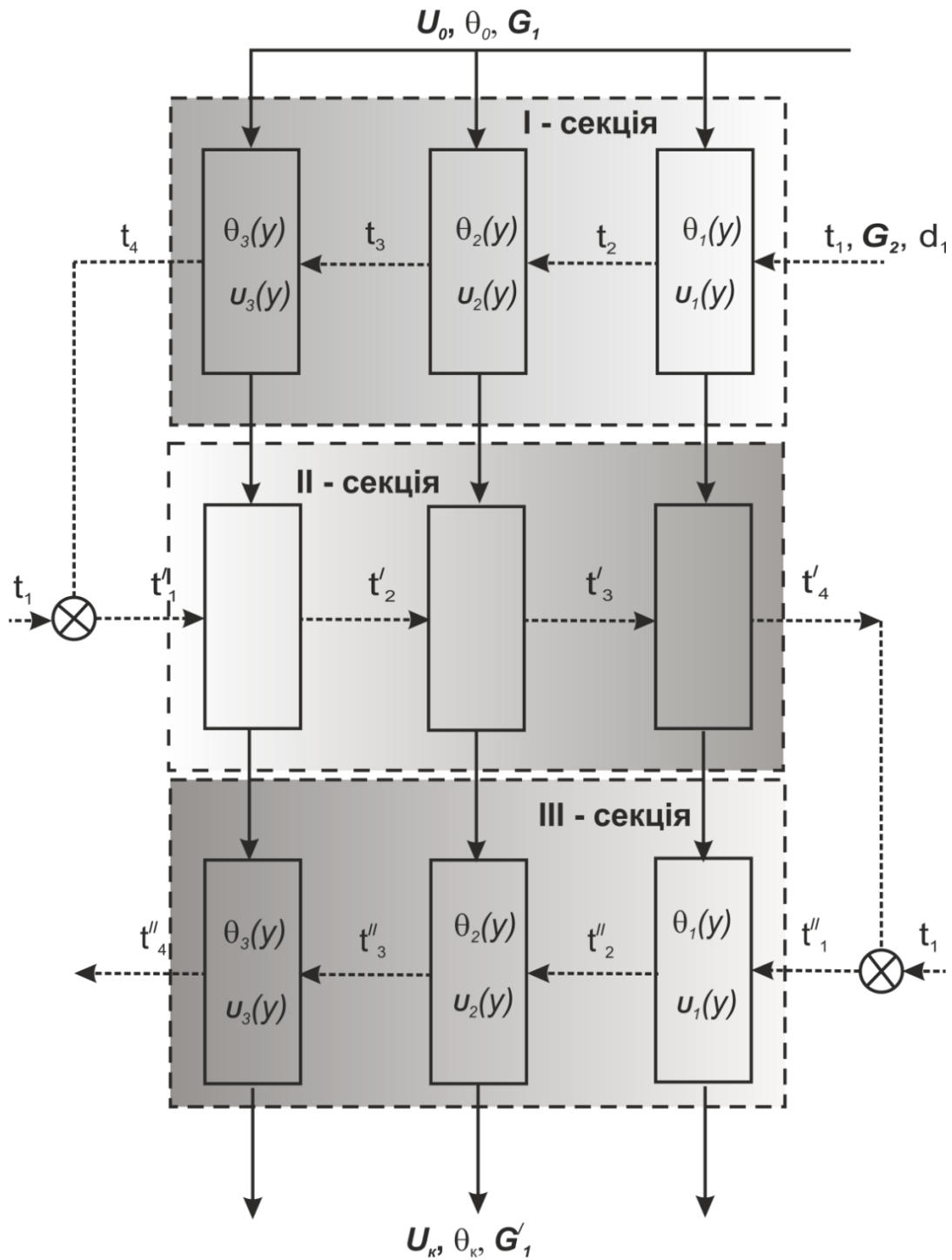


Рис.2. Схема розрахунку

Відповідно до схеми розрахунків і вихідних рівнянь в межах першої секції в напрямку руху матеріалу справедливі наступні розрахункові формули:

$$\begin{aligned} \theta_1(y) &= t_1 - (t_1 - \theta_0) \cdot e^{-k_1 y}; \\ t_2(y) &= \theta_1 + (t_1 - \theta_1(y)) \exp(-k_2); \\ U_1(y) &= U_p + (U_0 - U_p) \exp(-k_3(t_1(y)) \cdot y); \\ d_2(y) &= d_1 + R \cdot U_0 - R \cdot U_1(y); \quad R = \frac{G_2}{G_0}. \end{aligned} \quad (24)$$

Для другого шару першої секції:

$$\begin{aligned} \theta_2(y) &= t_2(y) - (t_2(y) - \theta_0) \cdot e^{-k_1 y}; \\ t_3(y) &= \theta_2(y) + (t_2(y) - \theta_2(y)) \exp(-k_2); \\ U_2(y) &= U_p + (U_0 - U_p) \exp(-k_3(t_2(y)) \cdot y); \\ d_3(y) &= d_2(y) + R \cdot U_0 - R \cdot U_2(y). \end{aligned} \quad (25)$$

Для третього шару першої секції:

$$\begin{aligned} \theta_3(y) &= t_1 - (t_1 - \theta_0) \cdot e^{-k_1 y}; \\ t_4(y) &= \theta_3(y) + (t_3(y) - \theta_3(y)) \exp(-k_2); \\ U_3(y) &= U_p + (U_0 - U_p) \exp(-k_3(t_4(y)) \cdot y); \\ d_4(y) &= d_3(y) + R \cdot U_0 - R \cdot U_3(y); \end{aligned} \quad (26)$$

і т.д.

При розрахунку другої зони сушіння вихідні дані визначаються в такому порядку: Визначається середньо інтегральна температура на виході останнього шару:

$$\bar{t}_5(y) = \frac{1}{L} \int_0^L (\theta_5(y) + (t_4(y) - \theta_5(y)) \cdot e^{-k_2}) dy \text{ і вологовміст } \bar{d}.$$

Визначаються параметри зерна на виході зони для кожного шару:

$$\theta_4(L), U_4(L), \text{ при } y=L.$$

Визначені значення $\bar{t}_5(y), \bar{d}(y), \theta_4(L), U_4(L)$ дорівнюють вхідним значенням початкових умов в другій зоні сушіння:

$$\theta_4(L) = \theta'_0; U_4(L) = U'_0; t'_1 = \bar{t}_5(y); d'_1 = \bar{d}_5(y)$$

Результати розрахунків за розробленим і наведеним математичним апаратом представлені на рис.3,4.

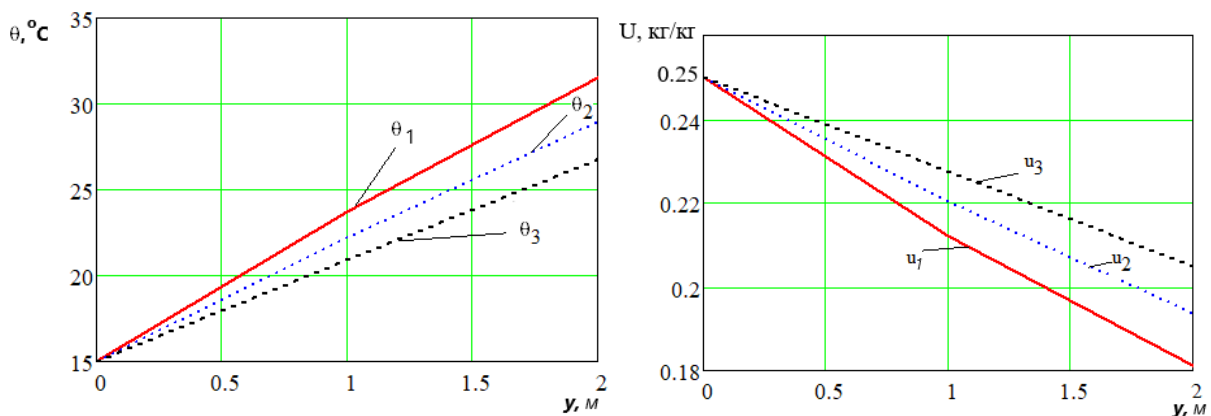


Рис.3. Кінетики зміни температури і вологовмісту зерноматеріалу в I-секції сушарки

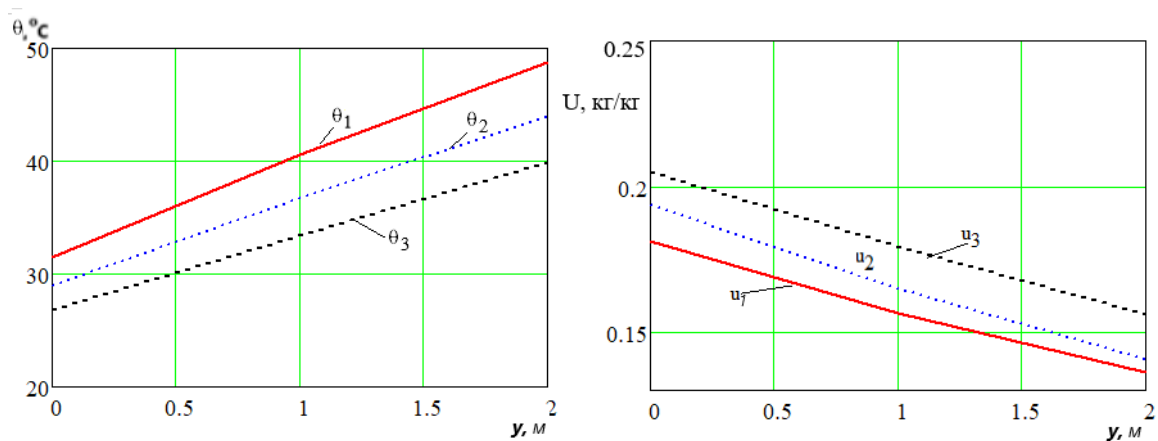


Рис.4. Кінетики зміни температури і вологовмісту зерноматеріалу в II-секції сушарки

Висновки.

1. В результаті проведених теоретичних досліджень розроблений математичний апарат для опису стаціонарних процесів конвективного тепломасообміну дисперсного матеріалу при перехресному русі матеріалу і сушильного агента.

2. На основі модифікованої чарункової моделі отримані прості математичні залежності розподілу параметрів матеріалу та сушильного агента в щільному рухомому шарі в напрямках руху перехресних потоків. Визначені формули дозволяють проводити розрахунки режимів діючих установок конвеєрного, колонкового типів при секційованому вводі сушильного агента.

Список використаних джерел

1. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів/ В.Ф.Дідух. Монографія.–Луцьк. ЛДТУ. –2002. –165с.
2. Сорочинский В.Ф. Снижение затрат при конвективной сушке зерна/ В.Ф.Сорочинский // Наукові праці ОНАХТ. Одеса. –2010. –Вип.38.Т.1.–С.79-82.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок /О.Г.Бурдо. Одеса: Полиграф, 2010.–368с.
4. Гапонюк І.І. Науково-технічні основи високопродуктивних інноваційних технологій післязбиральної обробки зерна / І.І.Гапонюк. Автореф. дис. докт. техн. наук. –К., 2012. –38с.
5. Матківська І.Я. Механізм і кінетичні закономірності фільтраційного сушіння зерна пшениці /І.Я.Матківська. Автореф. дис. канд. техн. наук. Львів, 2015. –20с.
6. Степанов М.Т. Математическое имитационное моделирование зерносушилок как основа разработки систем управления/М.Т.Степанов, М.А.Еремин, П.А.Вернидубов // Автоматизація технологічних і бізнес процесів. –2014. –№3. –С.16-21.
7. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. –208с.
8. Котов Б.І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження)/ Б.І.Котов, Р.А.Калініченко, С.П.Степаненко, В.О.Швидя, В.О.Лісецький – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2017.– 552 с.

9. Кірчук Р.В. Теоретичні передумови моделювання процесу сушіння дисперсних рослинних матеріалів /Р.В.Кірчук // Сільськогосподарські машини. Луцьк. –2017. Вип.37.– С.47-56.
10. Котов Б.І. Моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в безперервних сушарках колонкового типу /Б.І.Котов., Р.А.Калініченко, А.В.Спірін // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексу. Харків.: ХТУСГ.–2016.–№6.–С.63-68.
11. Загоруйко В.А. Моделирование и метод расчета кинетики процесса сушки зернистых материалов /В.А.Загоруйко, Ю.И.Кривошеев, А.В.Соколовская // Промышленная теплотехника. К., 1982. Т.2.№2. С.81-89.
12. Котов Б. І. Математична модель охолодження вологого зерна у вентильованих бункерах з радіальним розподіленням повітря / Б. І. Котов, В.О. Грищенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. - 2017. - Вип. 47(1). - С. 132-139.
13. Станкевич Г.Н. Обоснование параметров колонковых сушилок для семян подсолнечника / Г.Н.Станкевич, Л.К.Овсянникова, О.Ю.Веселовская и др.// Наукові праці ОДАХТ. Одеса, 2002. Вип.24. С.9-14.
14. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя / А.В.Демин, Ю.В.Есаков., И.Я.Мильман, Т.А.Ананьева. –М.Виесх, 1977. –42с.

Аннотация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ С ПЕРЕКРЕСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗЕРНА И СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ПРИ ЕГО СЕКЦИОННОМ ВВОДЕ

Калиниченко Р.А., Швыдья В.А., Степаненко С.П., Котов Б.И.

В статье рассмотрены процессы тепло- и массообмена в процессе сушки зерна в вертикальных колонках с перекрестным движением сушильного агента при его последовательной подаче в каждую секцию. Построена математическая модель процесса и адаптировано ее в расчетную форму модифицированной ячеистой модели полного перемешивания сушильного агента и полного вытеснения материала в направлении его движения.

Abstract

MATHEMATICAL MODEL OF THE DRYING PROCESS WITH THE CROSS-MOTION OF GRAIN AND DRYING AGENT AT ITS SECTIONAL INPUT

Kalinichenko R.A., Shvydyia V.A., Stepanenko S.P., Kotov B.I.

The article discusses the processes of heat and mass transfer in the process of drying the grain in vertical columns with the cross-motion of the drying agent when it is sequentially supplied to each section. A mathematical model of the process was constructed and adapted to the calculated form of a modified cellular model of complete mixing of the drying agent and complete displacement of the material in the direction of its movement.