

УДК 631.365.3+631.563.2

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ СУШІННЯ ЛИСТОСТЕБЛОВИХ МАТЕРІАЛІВ АКТИВНИМ ВЕНТИЛЮВАННЯМ

Котов Б. І., д.т.н.

*Національний університет біоресурсів і природокористування  
України*

Кузьменко В.Ф., к.т.н.

*Національний науковий центр «ІМЕСГ»*

Тел.: +38 (0619) 42-05-70

**Анотація** - розглянуто побудову математичної моделі сушіння стеблових рослинних матеріалів в штабелі активним вентиляванням.

**Ключові слова** – листостеблові матеріали, сушіння, математична модель.

*Постановка проблеми.* Сушіння сільгосппродуктів і матеріалів, як метод консервації, підготовки до зберігання та подальшої переробки є одним із основних процесів післязбиральної обробки продукції рослинництва.

Сучасні теплові сушарки, на яких традиційно висушують рослинні продукти, не придатні для сушіння листостеблових матеріалів (пров'ялені трави, льоносировина, рослинно-насіenneвий ворох, та ін.). Тому для досушування таких продуктів, як свідчить світовий досвід, доцільним і перспективним на найближчий час є метод активного вентилявання атмосферним або нагрітим (на 4-6 °С) повітрям. Сутність метода полягає в тому, що укладена в штабель попередньо пров'ялена в полі маса, досушується фільтрацією примусово поданого повітря. В процесі вентилявання штабелю повітря одночасно підводить теплоту, а також випаровує і видаляє вологу. При цьому, як показує практика, тільки частина енергії нагрітого повітря витрачається на видалення вологи. Частина теплоти витрачається з потоком повітря, що видаляється. Для більш повного відпрацювання повітря, як сушильного агента, виключення небажаного явища випадання вологи в верхньому шарі штабеля необхідно визначити і реалізувати оптимальний режим вентилявання. Таким чином для розрахунку і керування процесом досушування

рослинної маси в штабелі необхідно розробити математичну модель, яка відтворює реальний процес змінення вологості продукту і параметрів повітря в часі і за координатами (в просторі).

*Аналіз останніх досліджень.* Математичні моделі процесів періодичного сушіння рослинних матеріалів наведені в узагальнюючих роботах [1,2,3] та окремих працях [4,5], як правило використовують кінетичну залежність О.Ликова з експериментально визначеними закономірностями змінення коефіцієнта сушіння. При цьому практично не враховуються такі вагомні фактори як самозігрівання при виділенні біологічної теплоти, нерівномірність розподілу маси продукту за висотою штабеля та інші.

*Формулювання цілей статті.* Розробити математичну модель динаміки сушіння рослинних матеріалів з урахуванням розподілу насипної щільності за висотою штабеля і виділення біологічної теплоти.

*Основна частина.* Розглянемо нерухомий шар дисперсного матеріалу крізь який фільтрується повітря, в одному напрямку (одномірна задача). Вологий матеріал виділяє теплоту, яка разом з теплою повітря витрачається на видалення вологи; величина насипної щільності матеріалу має максимальне значення в місці входу потоку повітря і зменшується в напрямку його руху.

В основу фізичної моделі покладено дифузійно - конвективний перенос вологи від матеріалу до омиваючого його повітря.

Специфіка сушіння нерухомого фільтрованого шару дисперсного матеріалу ( яким є штабель листостеблової рослинної маси ) полягає в тому, що швидкість змінення вологовмісту частинок матеріалу, які знаходяться на певній висоті в середині шару, залежить тільки від параметрів (температура, вологість) повітря на цій висоті.

Розподіл вологовмісту повітря за висотою шару матеріалу ( вважаємо, що сушильний агент-повітря фільтрується крізь шар знизу вверху ) визначається із матеріального балансу (кількість вологи, що виділяється з матеріалу повністю поглинається повітрям). Для шару маси елементарної висоти  $dz$ , зважаючи на наявність режиму повного витіснення при фільтраційному русі повітря крізь шар, з масовою швидкістю  $G$  та вологовмістом  $X$  рівняння матеріального балансу буде мати вигляд

$$-\frac{\partial(G \cdot x)}{\partial z} dz = \rho_0 F_p \frac{\partial u}{\partial \tau} dz \quad . \quad (1)$$

Враховуючи, що  $G = F_p \cdot \dot{v} \cdot \rho_v$ , після спрощень отримаємо

$$v \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{\partial u \cdot \rho_0}{\partial \tau \cdot \rho_v} = 0 \quad , \quad (2)$$

де  $x$  - вологовміст повітря, кг/кг с. р;  
 $u$  - вологовміст матеріалу кг/ кг с. р;

$F_p$  - площа повіторорозподільчої решітки,  $m^2$ ;  
 $\rho_v, \rho_0$  - густина повітря і сухої речовини матеріалу  $kg/m^3$ ,  
 $v$  – швидкість повітря,  $m/s$ .

Для опису кінетики сушіння елементарного шару матеріалу приймається рівняння, що характеризує швидкість масопередачі крізь поверхню розділу фаз (рідкої частини твердого матеріалу і повітря), що відповідає закону Дальтона.

$$j_m = K(P_1 - P_2), \quad (3)$$

де  $j_m$  - інтенсивність вологопереносу,  $kg/c\ m^2$ ;  
 $P_1, P_2$  - парціальний тиск вологи повітря на поверхні матеріалу і повітрі,  $Pa$ ;  
 $K$  - коефіцієнт масопередачі,  $kg/c \cdot Pa$ .

Якщо в якості рухомої сили масопереносу використовувати різницю вологовмісту повітря при термодинамічних умовах на поверхні матеріалу і в потоці омиваючого повітря, то інтенсивність вологовидалення з поверхні матеріалу можна виразити рівнянням

$$j_n = \sigma_x (x_n - x_n) \cdot S, \quad (4)$$

де  $\sigma_x$  - коефіцієнт випаровування,  $kg/m^2 \cdot год$ ;  
 $x_n, x_n$  - вологовміст насиченого повітря, при температурі поверхні і вологовміст повітря,  $kg/kg\ c.p.$ ;  
 $S$  – поверхня,  $m^2$ .

Вологовміст насиченого повітря визначається відомим співвідношенням

$$x_i = 0,622 \frac{P_i}{P - P_i}. \quad (5)$$

Оскільки величина барометричного тиску  $P$  повітря набагато вища за парціальний тиск насиченого повітря  $P \gg P_n(t)$  в межах температури  $t = 15-30^\circ C$ , то використовуючи лінійну апроксимацію залежності  $P_n(t) = a_1 \theta$ , співвідношення (5) можна спростити

$$X_n = \frac{0.622}{P} a_1 \theta, \quad (6)$$

де  $\theta$  – температура поверхні матеріалу,  $^\circ C$ ;  $a$  – коефіцієнт.

Початкова вологість трав, які підлягають досушуванню, набагато більша (45-50 %) за вологість інших матеріалів, тому в процесі сушіння в рослинній масі виділяється значна кількість біологічної теплоти, що приводить до збільшення її температури. Інтенсивність виділення теплоти і, відповідно самозігрівання, в

значній мірі залежить від вологості рослин [1] і припиняється тільки при зниженні вологості до 15-17 %. Апроксимація експериментальних даних [1] дозволяє, в першому наближенні, визначити лінійну залежність величини температури матеріалу від його вологості при самозігріванні:  $\theta = a_2 \cdot u$ . Таким чином, виключаючи з подальшого аналізу температуру матеріалу визначимо вологовміст повітря в поверхневому шарі матеріалу в стані насичення (7) спрощеним співвідношенням:  $\chi_{ii} = a \cdot u$ , де  $a$  – стала величина, яка визначається з експерименту.

Інтенсивність вологопереносу, за визначенням виражається як  $j_m = -m_0 \frac{du}{d\tau}$ , тоді з рівняння (4) з урахуванням вищенаведених посилянь отримаємо рівняння кінетики сушіння

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot \sigma_0 (a \cdot u - x), \quad (7)$$

де  $\sigma_0 = \frac{S}{m_0}$  - питома поверхня рослинної маси, м<sup>2</sup>/кг.

Розділимо обидві частини рівняння (7) на  $a$

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot \sigma_0 \cdot a \left(u - \frac{x}{a}\right) = K_1 (u - u_p), \quad (8)$$

де  $u_p = \frac{\chi}{a}$ ,  $K_1 = K \cdot \sigma_0 \cdot a$

Таким чином отримане рівняння за своєю структурою аналогічно рівнянню кінетики сушіння О.В. Ликова [2,3] для періоду падаючої швидкості і кінетичні коефіцієнти  $K_1$  та  $a$  можна визначити на основі експериментальних даних по висушуванню елементарного шару рослинної сировини.

Приймаючи за даними експериментів [1], що насипна щільність трав'яної маси в штабелі висотою до 5 м змінюється за експоненціальним законом

$$\rho_0 = \rho_1 \cdot e^{-kz}. \quad (9)$$

Отримуємо систему диференціальних рівнянь

$$v \frac{\partial \chi}{\partial z} = \frac{\rho_1}{\rho_v} \frac{\partial u}{\partial \tau} e^{-kz}. \quad (10)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = K_1 (au - \chi). \quad (11)$$

Оскільки система рівнянь (10), (11) чіткого аналітичного розв'язку не має застосовуємо наближення рішення. Приймаючи, що вологовміст повітря змінюється тільки за координатою отримаємо рішення рівняння (11) за початкових умов

$\tau = 0$ ;  $u = u_0$ ; (де  $u_0$  - початковий вологовміст матеріалу) у вигляді

$$u(\tau) = \frac{x}{a} + (u_0 - \frac{x}{a})e^{-k \cdot a \tau} . \quad (12)$$

Диференціюючи вираз (12) і порівнюючи отримане рівняння, з рівнянням (10) отримано нове рівняння

$$\frac{\partial x}{\partial z} = f(\tau)(u_0 \alpha - x)e^{-kz} , \quad (13)$$

$$\text{де } f(\tau) = \frac{\rho_1 k_1}{\nu \rho_v} e^{-k \cdot a \tau}$$

Розв'язок рівняння (13) за граничних умов:  $z=0$ ;  $x_0=x_l$  ( $x_0$  - значення вологовмісту повітря на вході в шар матеріалу) дає можливість отримати нестационарний розподіл вологовмісту за висотою шару матеріалу, що вентилюється у вигляді

$$x(z, \tau) = a u_0 - (a u_0 - x_0) e^{-p(z, \tau)} , \quad (14)$$

$$\text{де } p(z, \tau) = \frac{\rho_1 K_1}{\nu \rho_v K} e^{-K_1 a \tau} (1 - e^{-Kz}) .$$

З рівнянь (11) і (14) отримаємо нестационарний розподіл вологовмісту матеріалу за висотою штабелю рослинної маси при фільтрації повітря

$$u(z, \tau) = u_0 e^{-a K_1 \tau} + (1 - e^{-a K_1 \tau}) [u_0 - (u_0 - u_p) e^{-p(z, \tau)}] . \quad (15)$$

Отримані рівняння (14 і 15) дозволяють визначити змінення вологовмісту (абсолютної вологості) матеріалу і повітря, що фільтрується за часом і координатою (висотою штабелю) при різних режимах примусового вентилявання.

Таким чином, в межах зроблених припущень, задача визначення нестационарних профілів вологовмісту матеріалу за висотою нерухомого шару, що фільтрується повністю вирішується.

Необхідно відмітити, що структура наведених вище співвідношень, отриманих на основі рівнянь масообміну в цілому співпадають із структурою відповідних співвідношень отриманих на основі рівнянь теплообміну [6].

*Висновки.* Отримано математичну модель процесу досушування листостеблової маси активним вентиляванням, яка дозволяє визначити зміни вологості матеріалу в часі і за висотою при наявності біологічних тепловиділень. В моделі враховане природне ущільнення матеріалу, і розподіл густини за висотою.

Література.

1. *Пятрушевичюс В.И.* Активное вентилирование травяных кормов. / *В.И. Пятрушевичюс, В.М. Любарский.* - Л: Агропромиздат, 1986. -95с.
2. *Мальтри В.* Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / *В. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер.* - М: Машиностроение, 1979. – 525 с.
3. *Дідух В.Ф.* Підвищення ефективності сушки сільськогосподарських рослинних матеріалів / *В.Ф. Дідух.* - Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2002. - 165 с.
4. *Котов Б.И.* К определению динамики сушки трав в плотном слое / *Б.И. Котов* / *Механизация и электрификация сельского хозяйства.* - К.: 1985. - Вып.61. - С. 58-60.
5. *Котов Б.И.* Ідентифікація закономірності тепло- і масоперенесення в процесах охолодження і зберігання рослинної сировини / *Б.И. Котов, В.О. Грищенко* / *Збірник наукових праць КДТУ.*– Кіровоград, 2004. - Вип. 3. – С. 80-83.
6. *Фролов В.Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов/ *В. Ф. Фролов.* - Л.: Химия, 1987. – 208 с.

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СУШКИ ЛИСТОСТЕБЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ АКТИВНЫМ ВЕНТИЛИРОВАНИЕМ**

Котов Б. И., Кузьменко В.Ф.

#### *Аннотация*

**В статье рассмотрено построение математической модели сушки стебельчатых растительных материалов в штабеле активным вентилированием.**

### **MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS OF LEAFSTEM MATERIALS DRYING BY ACTIVE AERATION**

B. Kotov, V. Kuzmenko

#### *Summary*

**The construction of mathematical model of stem vegetable materials drying in a stack by active aeration is considered in the article.**