

УДК 621.18.01

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ТЕПЛО- ВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ РОСЛИННИХ ПРОДУКТІВ

Котов Борис Іванович д.т.н., професор

Грищенко Володимир Олександрович асистент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Кормановський Сергій Іванович к.т.н., доцент

Вінницький національний аграрний університет

Kotov B.

Gryshenko V.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Kormanovskiy S.

Vinnitsia National Agrarian University

Анотація: розроблено математичну модель вологотеплової обробки рослинних продуктів парою в апаратах безперервної дії.

Ключові слова: математична модель, вологотеплова обробка, рослинні продукти, пропарювачель.

Постановка питання

При дії на рослинні продукти (зерно, корене-бульбоплоди та ін.) теплотою, тиском або їх комбінацією в певних режимах відбуваються складні структурно-механічні і біохімічні перетворення, дозволяючи підвищити ефективність використання харчових речовин тваринами.

Відомі способи вологотеплової обробки зерна з послідовним плющенням або екструзією [1,2], запарювання коренеплодів [1]. Збільшення ефекту обробки супроводжується зростанням витрат енергії.

Найбільш ефективним способом обробки зернових і соковитих матеріалів є пропарювання в апаратах шахтного типу в рухомому шарі, що рухається. Обробка зерноматеріалів парою значно прискорює процеси нагрівання і зволоження у порівнянні з іншими способами. Ефективність обробки і енерговикористання в агрегатах термовологісної обробки зерна залежить від режимних параметрів процесу основним з яких є експозиція обробки (час досягнення максимальної температури і вологості матеріалу). Визначення взаємозв'язку між режимними параметрами, ступенем нагріву і зволоження матеріалу відбувається експериментальними методами для конкретних типів апаратів, що обмежує використання отриманих даних.

Мета досліджень

Розробити математичний опис динамічних режимів процесів нагріву і зволоження матеріалу водяною парою й ідентифікація параметрів математичної моделі.

Матеріали та методика досліджень

Специфіка досліджуваного процесу обумовлює використання аналітичного методу досліджень як основного. На основі отриманої інформації про фізичні особливості процесу

формується математична модель, розв'язується система рівнянь і знаходяться аналітичні вирази для визначення динамічних характеристик процесу. На основі співставлення аналітичних залежностей з даними експериментів уточнюються коефіцієнти диференціальних рівнянь.

Результати досліджень

В основу математичного опису режимів роботи апарата (рис.1) покладено диференціальні рівняння теплового та матеріального балансу, а також диференціальні рівняння теплопровідності та масопровідності (дифузії) для тіла канонічної форми (кулі).

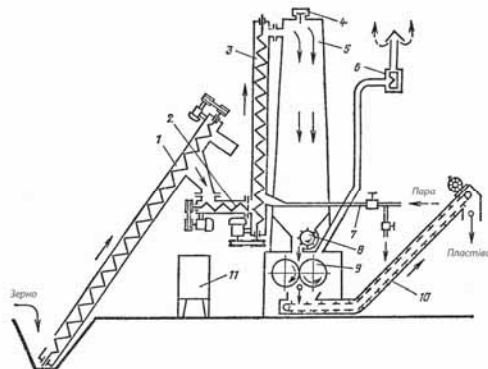


Рис. 1. Технологічна схема агрегату ПЗ-3: 1, 3 – гвинтові конвеєри для завантажування та подачі; 2 – дозатор гвинтовий; 4 – запобіжний клапан; 5 – шахта пропарювача; 6 – витяжний вентилятор; 7 – паропровід; 8 – барабанний дозатор; 9 – плющильні вальці; 10 – вивантажний скребковий конвеєр

Для певного спрощення розв'язку задачі динаміки нагріву і зволоження дисперсного матеріалу водяною парою в рухомому шарі, залишаючись, при цьому в практично прийнятних межах введемо наступні (загальноприйнятні) припущення:

- фізичні властивості робочих середовищ (зерно, пара) умовно прийняті сталими віднесені до середніх значень параметрів на вході і виході;
- нагрівання і зволоження зернини без градієнтне (тобто враховується середньооб'ємні значення);
- не враховується вплив плівки води на внутрішній поверхні апарата на тепловологісні процеси в апараті;
- установка тепловологісної обробки матеріалу розглядається як апарат ідеального змішування;
- водяна пара, яка подається в камеру повністю конденсується на поверхні зерна;
- акумуляція теплоти і маси відбувається в матеріалі.

Математичну модель апарата (процесу) знайдемо у вигляді рівнянь динаміки зміни температури і вологовмісту матеріалу (зерна) на виході із кондиціонера, для чого складемо наступні рівняння теплового і матеріального балансу:

$$m_3 c_3 \frac{d\theta_2}{dt} = Q_{\text{п}} + Q_{31} - Q_{\text{кз}} - Q_{32}; \quad (1)$$

$$m_0 \frac{dU_2}{dt} = W_{31} + W_{\text{к}} - W_{32}; \quad (2)$$

В рівняннях (1) – (2) позначено : θ_2, U_2 – температура і вологовміст матеріалу на виході апарата, відповідно, $^{\circ}\text{C}$ і $\text{кг}/\text{кг}_{\text{с.р}}$; m_3, m_0 – маса вологого і абсолютно сухого

матеріалу, кг; C_3 – питома теплоємність сухого зерна, Дж/кг °С; $Q_n = G_n i_n$ – кількість теплоти, що вноситься паром в одиницю часу Дж/с; G_n – витрати пари, кг/с; i_n – питома ентальпія пари, Дж/кг; $Q_{31} = G_{31} C_{31} \theta_1$ – кількість теплоти, що вноситься зерном з температурою θ_1 ; C_{31} – питома теплоємність сухого зерна, Дж/кг °С.

$Q_{k3} = G_n i_k$ – кількість теплоти конденсації, яка поглинається матеріалом, Дж/с; i_k – питома ентальпія конденсата, Дж/кг.

$Q_{32} = G_{32} C_{32} \theta_2$ – кількість теплоти, що виноситься зерном з апарата, Дж/с, G_{32} – витрати зволоженого зерна з температурою θ_2 , кг/с, C_{32} – питома теплоємність вологого зерна, Дж/кг °С.

$W_{31} = G_0 U_1$ – кількість вологи, що вноситься матеріалом в апарат, кг/с. G_0 – витрати абсолютно сухого зерна, кг/с, U_1 – початкова вологість матеріалу, кг/кг с.р.; W_k – кількість сконденсованої вологи, яка поглинена матеріалом, кг/с; W_{32} – кількість вологи, яка видаляється з вологим зерном з апарата, кг/с.

Окремі складові в наведених співвідношеннях визначаються відомими і очевидними формулами:

$$i_n = r_0 + c_n t_n; i_k = C_p \theta_2; G_{32} = G_{31} + G_n; G_k = G_n = G_0 \frac{dU}{dt},$$

де r_0 – питома теплота пароутворення, Дж/кг, C_n, C_p – питома теплоємність пари і рідини, Дж/кг °С.

Підставивши визначені значення складових в рівняння теплового і матеріального балансу (1) і (2) після відповідних перетворень отримаємо:

$$m_c \frac{d\theta_2}{dt} = a_1 - G_1 \theta_2; \quad (3)$$

$$m_0 \frac{dU_2}{dt} = G_0 U_1 - G_0 U_2 + m_0 \frac{dU}{dt} = a_2 - b_2 U_2; \quad (4)$$

$$\text{де } a_1 = G_{32}(r_0 + C_n t_n) + G_{31} C_{31} \theta_1;$$

$$b_1 = G_n C_p + G_{32} C_2; a_2 = G_0 U_1 + m_0 \frac{dU}{dt}; b_2 = G_0.$$

Приймаючи величини: $G_n, t_n, G_{31}, \theta_{31}$ сталими рівняння (3) можна про інтегрувати. За початкових умов: $\tau = 0; \theta_2 = \theta_1$ розв'язок рівняння (3) набуває вигляду:

$$\theta_2(\tau) = \frac{a_1}{b_1} - \left(\frac{a_1}{b_1} - \theta \right) e^{-\frac{b_1}{m_c} \tau}. \quad (5)$$

Величина a_1/b_1 визначає максимальне значення температури зерна (в усталеному режимі):

$$\theta_{\infty} = \frac{a_1}{b_1} = \frac{G_n(r_0 + c_n t_n)}{G_n C_p + G_{32} C_{32}}. \quad (6)$$

Для розв'язку рівняння (4) необхідно знати залежність швидкості зволоження зерна від параметрів процесу, зокрема температури матеріалу.

Скористаємося основними положеннями теорії дифузійних процесів (масо переносу). Зволоження сухого рослинного матеріалу, розпилюваною водою, або сконденсованою парою на поверхні можна розглядати як процес проникнення вологи у вільне від неї пористе середовище, регулюючими силами внутрішнього тертя, який називають дифузією –

переміщення вологи з місць із більш високою концентрацією (в об'ємі сухої речовини) до місць з більш низькою концентрацією. Швидкість дифузії (тобто зволоження матеріалу), за законом Фіка, пропорційна градієнту концентрації. Масова концентрація вологи в сухому матеріалі є вологовміст матеріалу $U = \frac{C}{\rho_0}$, де C – об'ємна концентрація вологи, кг/м³, а процес зволоження за описаним механізмом – сорбцією. Переміщення вологи всередині матеріалу (внутрішній масо перенос) відбувається під дією градієнту вологовмісту за законом Фіка:

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{a_m}{\rho_0} \frac{dU}{dx}; \quad (7)$$

де dM – кількість вологи яка дифундує за час dt через одиницю поверхні, кг/с;

a_m – коефіцієнт масопровідності, м²/с;

x – координата вздовж напрямку переміщення вологи, м.

За аналогією з рівнянням теплопровідності можливо отримати рівняння масопровідності [3].

Для твердого пористого тіла у вигляді кулі радіусом R , диференціальне рівняння масопровідності можливо записати у вигляді:

$$\frac{\partial U(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 U(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right), \tau = 0; \quad 0 \leq r \leq R. \quad (8)$$

де R, r – радіус кулі, координата вздовж радіуса, м.

При концентрації пари на поверхні матеріалу остання зволожується і миттєво набуває значення максимально-гігроскопічного вологовмісту (точка на ізотермі сорбції матеріалу відповідає значенню $\varphi = 100\%$).

Тому граничні умови на поверхні кулі можна записати у вигляді граничних умов першого роду, тобто постійного поверхневого вологовмісту:

$$U(R, \tau) = U_{n,r} = Const, \quad (9)$$

умова симетрії:

$$\frac{\partial U(0, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (10)$$

Розв'язок диференціального рівняння (8) за крайніх умов (9), (10) можна отримати за аналогією з розв'язку задачі теорії теплопровідності про нагрівання кулі з постійною температурою поверхні [4]:

$$\frac{U(r, \tau) - U_0}{U_{n,r} - U_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{U_{n,r} - U_0} e^{-\mu_n^2 \frac{a_m}{R^2} \tau}, \quad (11)$$

де $A_n = (-1)^{n+1} \cdot 2$; $\mu_n = n \cdot \pi$ – корені характеристичного рівняння.

Рівняння (11) визначає розподіл вологовмісту за радіусом кулі для будь-якого часу зволоження матеріалу. Однак в нашому випадку необхідно визначити інтегральну вологість зерна, за кількістю поглиненої матеріалом вологи, тобто залежність вологовмісту матеріалу від часу зволоження.

Середній вологовміст матеріалу визначається за очевидним виразом:

$$U(\tau) = \frac{3}{R^2} \int_0^R r^2 \cdot U(r, \tau) \cdot dr. \quad (12)$$

Після інтегрування рівняння (11) відповідно до (12) отримаємо рівняння кінетики зволоження матеріалу в такому вигляді:

$$\frac{U(\tau) - U_0}{U_{п.г} - U_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu^2 \frac{a_m}{R^2} \tau}, \quad (13)$$

$$\text{де } B_n = \frac{\epsilon}{\mu^2} = \frac{\epsilon}{n^2 \mu^2}.$$

Оскільки ряд (13) швидко сходиться [4] можна обмежитись лише першим членом ряду, тобто рівняння (13) можна переписати у вигляді:

$$U(\tau) = U_{п.г} - (U_{п.г} - U_0) \frac{\epsilon}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{R^2} a_m \cdot \tau\right). \quad (14)$$

Розкладемо функцію e^{-k} в ряд ($e^{-k} = 1 - \frac{k}{1!} + \frac{k^2}{2!} + \dots$), обмежимося першими двома членами і підставимо отримане значення в рівняння (14). Після перетворень будемо мати:

$$U(\tau) = U_{п.г} - (U_{п.г} - U_0) \frac{\epsilon}{\pi^2} \left(1 - \frac{\pi^2}{R^2} a_m \tau\right). \quad (15)$$

Швидкість зволоження визначимо диференціюванням рівняння (15) за τ :

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{\epsilon}{R^2} (U_{п.г} - U_0) a_m. \quad (16)$$

Величина коефіцієнта масопровідності, як відомо [5] залежить від температури. Апроксимуючи, в першому наближенні, лінійною залежністю функцію $a_m(\theta) = K_m \theta(\tau)$ будемо мати рівняння динаміки зміни середньооб'ємного вологовмісту при обробці матеріалу водяною парою:

$$\frac{dU(\tau)}{d\tau} = \frac{G \cdot K_m}{R^2} (U_{п.г} - U_0) \theta(\tau). \quad (17)$$

Підставляючи значення функції $\theta(\tau)$ з рівняння (5) будемо мати:

$$\frac{dU(\tau)}{d\tau} = K_c \left[\frac{a_1}{b_1} - \left(\frac{a_2}{b_2} - \theta_1 \right) e^{-\frac{\theta_1}{m c \tau}} \right], \quad (18)$$

де $K_c = \frac{\epsilon K_m}{R^2} (U_{п.г} - U_0)$ – коефіцієнт сорбції.

З урахуванням рівняння кінетики зволоження матеріалу (18) диференціальне рівняння матеріального балансу можна представити у вигляді:

$$\frac{dU_2}{d\tau} + AU_2 = B_1 - B_2 e^{-k\tau}, \quad (19)$$

$$\text{де } A = \frac{G_0}{m_0}; \quad B_1 = \frac{G_0}{m_0} U_1 + K_c \frac{a_1}{b_1}; \quad B_2 = K_c \left(\frac{a_1}{b_1} - \theta_2 \right).$$

Розв'язок рівняння (19) шукаємо як суму рішень однорідного і частинного рівнянь, тобто:

$$U(\tau) = C \cdot e^{-A\tau} + R + N \cdot e^{-k\tau}, \quad (20)$$

де C – стала інтегрування, знаходиться з початкових умов $\tau = 0$; $U = U_0$; (U_0 – вологовміст матеріалу на початку процесу)

$$R = \frac{B_1}{A}; \quad N = -\frac{B_2}{A - K}; \quad C = U_0 + \frac{B_2}{A - K} - \frac{B_1}{A}.$$

Після перетворень остаточно будемо мати:

$$U(\tau) = U_0 e^{-A\tau} + \frac{B_2}{A - K} (e^{-A\tau} - e^{-K\tau}) + \frac{B_1}{A} (1 - e^{-A\tau}). \quad (21)$$

Таким чином отримані рівняння (5) і (21) визначають перехідний процес тепловологісної обробки матеріалу в апараті безперервної дії і дозволяють визначити зміну в часі температури і вологовмісту матеріалу в залежності від подачі матеріалу G витрати температури водяної пари, що подається в апарат.

Зміна температури і вологовмісту матеріал на виході апарата показана на рис. 2.

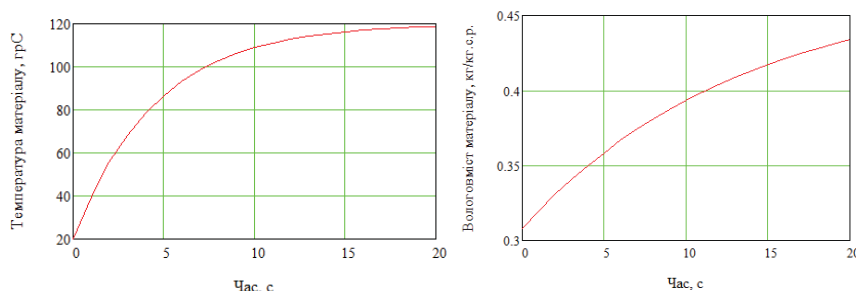


Рис. 2. Динамічні характеристики температури і вологовмісту матеріалу на виході апарату

Висновки

Розроблена математична модель динаміки вологотеплової обробки рослинних продуктів водяною парою в установках безперервної дії. Встановлені основні закономірності зміни в часі температури і вологовмісту матеріалу (зерна) при різних режимах обробки.

Список літератури

1. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов. – М.:Агропромиздат, 1987.-303с
2. Панченко М.И. Обоснование процесса влаготепловой обработки зерна и параметров пропаривания струйного типа. Автореф. дис.. канд.. техн.. наук Глевах. 1986.-14с.
3. Лыков А.В. Теплопроводность и диффузия в производстве кожи. ГИТЛ. М.-Л.-1941.-с.-240.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. «Высшая школа» М.: -1967.-599с.
5. Гинсбург А.С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов (А.С. Гинсбург, И.М. Савина// «Легкая пищевая промышленность». М.: -1982.-280с.

References

1. Kukta G.M. Mashiny i oborudovaniye dlya prigotovleniya kormov. - M. : Agropromizdat , 1987.- 303
2. Panchenko M.I. Obosnovaniye protsesssa vlagoteplovoy obrabotki zerna i parametrov proparivaniya struyного типа . Avtoref. dis .. kand .. tekhn .. nauk Gleva . 1986.- 14s .
3. Lykov A.V. Teploprovodnost' i diffuziya v proizvodstve kozhi. GITL . M.-L. - 1941. -s -240 .
4. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti . « Vysshaya shkola » M. : -1967. - 599s .
5. Ginsburg A.S. Massovlagoobmennyye kharakteristiki pishchevykh produktov (A.S. Ginsburg , I.M. Savina // « Legkaya pishchevaya promyshlennost' » . M. : -1982. - 280s .

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТЕПЛО-ВЛАЖНОЙ ОБРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ

Аннотация: разработана математическая модель влаготепловой обработки растительных продуктов паром в аппаратах непрерывного действия.

Ключевые слова: математическая модель, влаготепловой обработка, растительные продукты, пропариватель.

SIMULATION OF DYNAMIC MODE HEAT TREATMENT PLANT PRODUCTS HUMIDITY

Summary: a mathematical model volohoteplovoyi processing plant products in a couple of handsets continuous.

Keywords: mathematical model, volohoteplova treatment, herbal products, propariyuvatel.