

MASS TRANSFER FACTORS EFFECT ON KINETICS OF BEAN DRYING

R. Kirchuk*, L. Zabrodotska, K. Kopets

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



Key words:

bean,
modeling of bean
drying,
drying agent,
drying exposure,
energy saving

Article history:

Received 20.01.2021

Accepted 15.04.2021

*Corresponding author:

kirchukruslan@lutsk-
ntu.com.ua

ABSTRACT

Drying is the most energy-intensive and complex part of the process of post-harvest processing of crop products. In the choice of drying methods, it is necessary to take into account the technological parameters of the process, such as the initial and final moisture content of raw materials, physical and chemical and thermo-physical parameters, and further ways of processing products. Regardless of the manufacturer, grain dryers of different design have the same operation principle. The drying chamber of the grain dryer is its main design element; therefore, all manufacturers pay attention to its design. Also, the system of preparation of drying agent and the automation system and control system of the dehydration process are important elements of the design of the grain dryer, which need to be improved. However, little attention in the existing designs of dryers is paid to the accompanying systems of intensification of the drying process of plant materials. Taking into account the properties of agricultural materials, in particular legume seeds, a mechanical system of preparation of beans for heat treatment has been developed and the level of influence on drying kinetics, which is decisive in terms of energy saving, has been determined. The article analyzes the influence of mass transfer factors prepared by dissecting the surface, beans and drying agent parameters on the drying process. Mathematical models have been developed, based on the results of which energy-saving rational regimes of heat treatment of grain material for non-seed needs can be calculated. Also, proposed mathematical models based on the use of the basics of the drying and heat-mass transfer theory. Experimental studies have confirmed the adequacy of the proposed mathematical models.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.500>

УДК 631.365:633.34

**ВПЛИВ МАСООБМІННИХ ФАКТОРІВ НА КІНЕТИКУ СУШІННЯ
ЗЕРНА БОБОВИХ КУЛЬТУР****Р.В. Кірчук*, Л.Ю. Забродоцька, К.Є. Копець**

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

**Ключові слова:**

біб,
моделювання сушіння
зерен бобових культур,
сушильний агент,
експозиція сушіння,
енергозбереження

Історія публікації:

Отримано 20.01.2021

Затверджено 15.04.2021

Автор для*листування:**kirchukruslan@lutsk-
ntu.com.ua**АНОТАЦІЯ**

Сушіння – це найбільш енергоємний та відповідальний етап післязбирального оброблення продукції рослинництва. Під час вибору способів сушіння необхідно врахувати технологічні параметри процесу, такі як початкова і кінцева вологість рослинної сировини, її фізико-хімічні та теплофізичні показники, а також подальшу технологію її перероблення. Більшість відомих конструкцій зерносушарок є однотипними за принципом дії. Основний акцент виробниками сушарок робиться на конструкціях сушильної камери та системи приготування сушильного агента, також у сушарці важливими є система автоматизації і контролю перебігу процесу сушіння зерна. Важливо також удосконалювати і інші системи інтенсифікації процесу сушіння рослинних матеріалів. Зважаючи на властивості сільськогосподарських матеріалів, зокрема насіння бобових культур, розроблено механічну систему підготовки бобів до теплового оброблення і визначено рівень впливу оброблення сировини на кінетику сушіння, що є визначальним у напрямі енергозбереження. У статті виконано аналіз впливу розсічення поверхні бобів та параметрів сушильного агента на перебіг процесу сушіння. Розроблені математичні моделі, які дозволяють розрахувати енергозберігаючі раціональні режими теплового оброблення зерна, що використовується не для насінневих потреб. Для математичного опису процесу сушіння бобових культур використовувалися підходи, що базуються на класичних методах моделювання із використанням основ теорії сушіння та теорії тепломасообміну.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.500>

Стан питання та постановка проблеми

Під час обрання способу сушіння зерна необхідно ураховувати технологічні параметри процесу, зокрема початкову і кінцеву вологість сировини, її фізико-хімічні та теплофізичні показники, критичну температуру, за якої можливе руйнування основних складових зерна (вітамінів, білків тощо). Аналіз цих параметрів дозволяє синтезувати конструктивні особливості сушильних апаратів, що, у свою чергу, дозволяють застосовувати енергозберігаючі режими сушіння [1–3].

Відомі конструкції зерносушарок є однотипними за принципом дії. Основний акцент під час розроблення конструкцій сушарок робиться на конструкціях сушильної камери та системи приготування сушильного агента, а також системи автоматизації і контролю перебігу процесу сушіння. Разом із тим, у відомих конструкціях сушарок не передбачені системам інтенсифікації процесу сушіння рослинних матеріалів, які передбачають його підготовлення до процесу. Зважаючи на теплофізичні властивості сільськогосподарських матеріалів, зокрема насіння бобових культур, розроблення механічної системи підготовлення бобів до теплового оброблення та визначення впливу оброблення на кінетику сушіння є актуальним завданням. Вирішення цієї задачі дозволить суттєво зменшити енергетичні витрати на процес післязбирального оброблення зернового матеріалу.

Мета дослідження – дослідити вплив масообмінних факторів підготовлених до сушіння бобів та параметрів сушильного агента на кінетику процесу сушіння, що дозволить обґрунтувати енергозберігаючі раціональні режими теплового оброблення сировини.

Матеріали і методи

Для математичного опису процесу сушіння зерна бобових культур використовувалися підходи, що базуються на класичних методах моделювання із використанням основ теорії сушіння та теорії тепломасообміну.

Результати дослідження та обговорення

Проведений аналіз методів інтенсифікації сушіння зерна бобових культур та експериментальних даних вказує на доцільність попереднього підготовлення матеріалу до сушіння. Для підготовлення зерна бобових культур до процесу сушіння розроблена технологія, яка забезпечує формування зони пошкодження оболонки плоду бобових – надріз [4]. Проведене у такий спосіб підготовлення бобів до сушіння дозволяє забезпечити кращу взаємодію сушильного агента з матеріалом та інтенсифікує процес видалення вологи з нього. Також

інтенсифікувати процес видалення вологи можна шляхом підвищення температури і швидкості сушильного агента. Тому було проведено теоретичний аналіз сумісного впливу цих факторів на перебіг процесу сушіння.

Розглянемо вплив масообмінних факторів на кінетику процесу сушіння, якщо зернина (біб) розсічена. Під час розсічення зернини з'являється новоутворена відкрита поверхня, з якої інтенсивно (швидше, ніж з усієї поверхні) випаровується волога. Інтенсивність випаровування настільки висока, що теплота відбирається не тільки з повітря, а також із самого тіла зернини, що призводить до зменшення його температури. З точки зору зміни закономірності сушіння, появу "нової" поверхні можна розглядати як наявність в тілі, що піддається сушінню, додаткового стоку маси (вологи) або ж джерела видалення вологи з інтенсивністю, яка визначається законом масовіддачі. У цьому випадку випаровування вологи можна описати за допомогою рівнянням Дальтона [4]:

$$\frac{dG_w}{ds \cdot d\tau} = m(\tau), \quad (1)$$

де ds – поверхня випаровування, m^2 .

Наявність додаткового джерела видалення вологи призводить до зростання нерівномірності розподілу вологовмісту в об'ємі зернини, що спричиняє об'ємно-напружений стан поверхневого шару (зони). Результатом цього є деформація тіла за рахунок усадки колоїдної речовини, а саме "розгортання" зони розсічення і, відповідно, зміна ефективного розміру зернини і збільшення ефективної площі масообміну. Оскільки, відповідно до теорії сушіння [6], величина усушки пропорційна вологовмісту матеріалу, то розмір "розгорнутої" зони розсічення можна визначити таким чином:

$$l = l_0 \beta_e u, \quad (2)$$

де l_0 – початковий розмір розсічення; β_e – коефіцієнт лінійної усадки (для зерна – $\beta_e = 1,1-1,4$ [6]); u – вологовміст зернини, кг/кг.с.р.

Оскільки вологовміст зменшується, то буде зменшуватися і поверхнева зона. Зменшення поверхні зернини призводить до розгортання зони надрізу. Таким чином, для швидкого "розгортання" зони надрізу і збільшення інтенсивності додаткового джерела видалення вологи доцільно прискорити процес сушіння на початковому етапі.

Інтенсивне видалення вологи з відкритої поверхні призводить до висихання поверхні і заглиблення зони випаровування. Таким чином, інтенсивність додаткового джерела видалення вологи буде із часом знижуватися $m = m(\tau)$. Урахувати вплив додаткового поверхневого

джерела видалення вологи можна таким чином: у граничну умову додається складова, яка ураховує додаткове джерело видалення вологи:

$$-a_m \rho_0 \left(\frac{du}{dr} \right)_s + \frac{\rho_0 \cdot \beta}{a_m} \left[u - u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} \right] = 0, \quad (3)$$

де m_0 – максимальна інтенсивність видалення вологи.

Нехай, за аналогією з температурою “мокрого” термометра $t_m = t_c - \frac{r \cdot m}{\alpha}$ [7], величина $u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} = u_m$ визначає вологовміст “микрої” поверхні. Тоді, замінивши величину u_p на u_m , можна використати вже відомі розв’язки [4]:

$$u(r, \tau) = u_m + (u_0 - u_m) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \cdot \sin(\mu_n \frac{r}{R})}{(\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n) \cdot \mu_n \cdot \frac{r}{R}} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (4)$$

$$\text{де } u_m = u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta}.$$

У випадку $u_m \rightarrow u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta}$, матимемо:

$$-\frac{du(\tau)}{d\tau} = K(\theta)u(\tau) - u_m(\tau). \quad (5)$$

Рівняння кінетики сушіння (5), на відміну від відомого, ураховує інтенсивність випаровування із відкритої поверхні (інтенсивність випаровування не змінюється з часом).

У випадку зміни інтенсивності випаровування із відкритої (новоутвореної) поверхні з часом можна, за аналогією із зміною загальної швидкості сушіння з часом, прийняти експоненціальний закон зміни інтенсивності випаровування вологи, а саме:

$$m(\tau) = m_0 \cdot e^{-k\tau}, \quad (6)$$

де m_0 – інтенсивність випаровування на початку процесу сушіння (максимальна інтенсивність), кг/(м²·с).

Тоді гранична умова (3) матиме вигляд:

$$-a_m \rho_0 \frac{du(R, \tau)}{dr} + \beta \cdot \rho_0 [u - u_p] + m_0 e^{-k\tau} = 0. \quad (7)$$

Розв’язок диференціального рівняння масопровідності із урахуванням початкової умови і граничної умови (7) аналогічний

розв'язку рівняння теплопровідності кулі за наявності негативного джерела теплоти (теплота на випаровування поверхні) [2]:

$$\frac{u(r, \tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \frac{R \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m \cdot \sin \sqrt{Pd_m} \cdot \frac{r}{R}}{r \cdot \left[(Bi_m - 1) \cdot \sin \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \cos \sqrt{Pd_m} \right]} \cdot e^{-Pd_m \cdot Fo_m} + \sum_{n=1}^6 \left[1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right] \cdot A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (8)$$

де $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$; $Pd_m = \frac{k}{a_m} R^2$ – масообмінний аналог

критерію Предводітеля; $\bar{\theta}_m = \frac{m_0}{\beta(u_0 - u_p)}$ – безрозмірний комплекс

(критерій) масообміну.

Зміну середнього вологовмісту з часом можна визначити інтегруванням функції $u(R, \tau)$ [4]:

$$u(\tau) = u_p + (u_0 - u_p) \cdot \left[\frac{3 \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m (tg \sqrt{Pd_m} - \sqrt{Pd_m})}{Pd_m \left[(Bi_m - 1) \cdot tg \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \right]} \right] \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left(1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (9)$$

де $B_n = \frac{6Bi_m^2}{\mu_n^2 \cdot (\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m)}$.

На рис. представлені графічні залежності зміни вологовмісту за радіусом зернини з часом. Аналізуючи отримані графіки можна зробити висновок, що за наявності додаткової поверхні випаровування поверхневі шари бобу висихають швидше, а експозиція сушіння (зміна середнього за об'ємом вологовмісту) зменшується з 3600 с до 3000 с.

Доцільно також розглянути вплив параметрів, що характеризують зовнішню масопередачу – від матеріалу до сушильного агента. Наявність відкритої поверхні збільшує інтенсивність видалення вологи з поверхневої зони зернини, що призводить до збільшення усадки поверхні і “розгортання” об'єму зернини. Тому доцільно інтенсифікувати саме перший період зневоднення. Оскільки температура сушильного агента обмежена, то доцільно розглянути

можливість інтенсифікації процесу сушіння за рахунок швидкості сушильного агента.

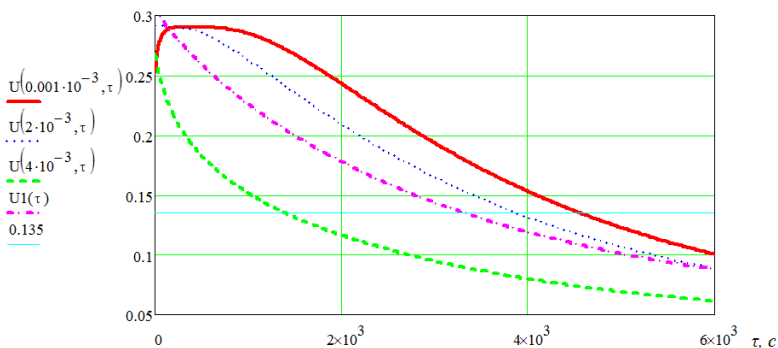


Рис. – Графічна залежність зміни вологовмісту за радіусом зернини з часом

У науковій праці [8] представлена експериментальна формула, яка отримана при випаровуванні води із кульок різного діаметра у вимушений потік повітря:

$$Nu_m = 0,9 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_m^{0,33}, \quad (10)$$

де $Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$ – критерій Рейнольдса; $Pr_m = \frac{\nu}{\alpha_v}$ – масообмінний

критерій Прандля; $Nu_m = \frac{\beta}{D} \cdot d_e$ – масообмінний критерій Нусельта;

d_e – еквівалентний діаметр, м; v – швидкість потоку повітря, що обтікає кулю, м/с; β – коефіцієнт масообміну, м/с; ν – кінематична в'язкість повітря, м²/с; D – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м²/с; α_v – коефіцієнт масопровідності повітря, м²/с.

Ураховуючи критеріальну залежність [4], можна визначити коефіцієнт масообміну з рівняння:

$$\beta = 0,9 \cdot v^{0,5} \cdot d_e^{-0,5} \cdot D_v^{0,67} \cdot \nu^{0,17}. \quad (11)$$

Коефіцієнт дифузії є функцією температури повітря:

$$[D(t)] = 0,00078 \left(\frac{T_v}{273} \right)^{1,21}, \quad (12)$$

де $T_v = t_v + 273$ – температура повітря, °С.

В'язкість – це функція вологовмісту повітря:

$$\nu = \nu_0 + k \cdot X. \quad (13)$$

Інтенсифікація процесів тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом дозволяє збільшити продуктивність технологічного обладнання і знизити енергоємність процесу.

Інтенсифікувати підведення теплоти і видалення вологи можна двома шляхами: збільшенням температури сушильного агента і температурного напору або збільшенням швидкості переміщення сушильного агента відносно поверхні бобу. Внутрішні вологопереміщення інтенсифікують підвищенням температури бобу і зменшенням гальмуючої дії температурного градієнта. Проте, можливість збільшення температури сушильного агента обмежена термолабільними властивостями рослинного матеріалу, а інерційність вологопровідності призводить до перегріву поверхні зернини. Збільшення швидкості сушильного агента обмежене виносом матеріалу із сушильної камери. Разом із тим, ураховуючи значну швидкість витання бобових (10–15,5 м/с) швидкість сушильного агента можна збільшувати, але не вздовж усього сушильного тракту. Кількість вологи, що видаляється безперервно, зменшується відповідно до кінетики сушіння [3, 6]:

$$W = G_0(u_0 - u(X)), \quad (14)$$

$$W = G_0 u_0 - G_0 \left[u_p + (u_0 - u_p) \cdot e^{-kx} \right]. \quad (15)$$

Оскільки кількість вологи в бобі зменшується вздовж сушильного тракту (висоти сушильної зони зерносушарки), доцільно зменшувати і кількість підведеної до матеріалу теплоти шляхом зменшення подачі сушильного агента за висотою сушарки. Оскільки кількість сушильного агента визначена (для певного типу сушарки) за кількістю вологи, що видаляється за весь процес сушіння, то ця кількість є середнім значенням витрат $\bar{G}_{c.a.}$. Приймавши кількість сушильного агента в кінцевій зоні (відповідно до кількості вологи, що видаляється) G_2 , можна визначити кількість сушильного агента в початковій зоні сушіння G_1 . Кількість сушильного агента в сушарках із продуктивністю $G = 5\text{--}12$ т/год. складає $G_v = 4,45$ кг/с [9] на одну планову тону матеріалу. Ураховуючи кінетику сушіння бобових, в першому наближенні прийнято лінійний характер розподілу витрат сушильного агента за висотою сушарки:

$$G_v(X) = 6,7 - 0,9H, \quad (16)$$

де H – висота сушильної камери, м.

У сушарці із газорозподільними коробами змінити подачу повітря за висотою камери сушіння можна шляхом забезпечення диференційованого підведення сушильного агента в камеру.

Параметри процесу подальшого сушіння зерна сої в прямоточній зерносушарці визначаються за залежностями:

- температура зерна:

$$\theta(x) = \theta_1 + \frac{K_2}{b} \Delta T_0 (1 - e^{-bx}); \quad (17)$$

- температура сушильного агента:

$$t(x) = \theta_0 + \frac{K_2}{b} \Delta T_0 (1 - e^{-bx}) + \Delta T_0 e^{-bx}; \quad (18)$$

- вологовміст зерна (абсолютна вологість):

$$u(x) = u_p + \Delta u_0 \cdot \exp[-Ax + B(1 - e^{-bx})]; \quad (19)$$

- вологовміст сушильного агента:

$$d(x) = d_1 + B_1 \cdot \ln \frac{G_1 - ax}{G_1} + \frac{b \cdot A_2}{a} \cdot x, \quad (20)$$

де t , θ – відповідно, температура сушильного агента і зерна бобових, °С; b – коефіцієнт апроксимації; u – вологовміст зерна, кг/кг;

$$K_1 = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot c_p}; \quad K_2 = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot G_m \cdot c_s}; \quad s - \text{площа поперечного перетину}$$

шару зерна; ρ – насипна щільність шару зерна; d_e – еквівалентний діаметр зернини; c_s – теплоємність зерна і сушильного агента; a – коефіцієнт теплообміну; u_p – рівноважний вологовміст кг/кг; x – координата, м; G_1 – витрата сушильного агента на вході в сушарку,

$$\text{кг/с; } A_1 = G_0 \Delta u_0 A; \quad A_2 = G_0 \Delta u_0 \cdot b \cdot B; \quad B_1 = \frac{1}{a} \left[\frac{b \cdot A_2 \cdot G_1}{a} - A_1 + A_2 \right].$$

Висновки

Формування “нових” поверхонь випаровування шляхом утворення розсічення поверхні бобу дозволяє підвищити інтенсивність подальшого теплового сушіння на 20–55% залежно від ступеня розсічення. Для кількісної оцінки ступеня інтенсифікації процесу сушіння запропоновано ввести коефіцієнт розсічення, який характеризує приріст площі випаровування і кількісний показник інтенсивності теплообміну – еквівалентний (ефективний) радіус зернини, який можливо змінювати в межах 1,0–1,1. Розроблено математичні моделі процесу сушіння зерна сої нагрітим повітрям, які ураховують стан матеріалу, що характеризується еквівалентним розміром, залежним від коефіцієнта розсічення, та інтенсивність випаровування із новоутвореної поверхні. Адекватність математичних моделей підтверджена результатами експериментальних досліджень,

оскільки відхилення між теоретичними та експериментальними даними знаходиться межах 3–7% [4].

Список посилань

1. Лыков, А.В. (1956). Тепло- и массообмен в процессах сушки. Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 464.
2. Лыков, А.В. (1967). Теория теплопроводности. Высшая школа, Москва, 599.
3. Гинзбург, А.С. (1973). Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Пищевая промышленность, Москва, 528.
4. Копець, К.Є. (2006). Розробка та обґрунтування параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння [Дисертація канд. техн. наук]. Львівський національний аграрний університет, Дубляни, 189.
5. Кірчук, Р.В., Цизь, К.Є. (2014). Машина для деформації насіннєвих оболонки. Патент №87184, Україна.
6. Лыков, А.В. (1968). Теория сушки. Энергия, Москва, 471.
7. Птицин, С.Д. (1978). Физические основы влагопереноса в семенах сельскохозяйственных культур. Труды ВИМ, 35, 12–14.
8. Рудобашта, С.П. (1980). Массоперенос в системах с твердой фазой. Химия, Москва, 248.
9. Гержой, А.П., Самочетов, В.Ф. (1967). Зерносушение и зерносушилки. Колос, Москва, 338.