

УДК 631.365:633.34

Кірчук Р.В.

к.т.н, доцент, кафедра інженерного та комп'ютерного
забезпечення агропромислового комплексу, Машинобудівний факультет
Луцький національний технічний університет

Луцьк, Україна

E-mail: ruslan-mail@ukr.net**Дідух В.Ф.**

д.т.н, професор, кафедра інженерного та комп'ютерного забезпечення
агропромислового комплексу, Машинобудівний факультет
Луцький національний технічний університет

Луцьк, Україна

E-mail: didukh_v@ukr.net**Сацюк В.В.**

к.т.н, доцент, кафедра інженерного та комп'ютерного
забезпечення агропромислового комплексу, Машинобудівний факультет
Луцький національний технічний університет

Луцьк, Україна

E-mail: vs-07 @ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ МЕТОДІВ СУШІННЯ НАСІННЯ БОБОВИХ КУЛЬТУР

Анотація

Технології післязбирального обробітку продукції рослинництва є надзвичайно енергозатратними і потребують пошуку шляхів енергозбереження.

Дослідження спирається на сучасні наукові уявлення що до методики опису процесів конвективного сушіння. Така методика сформована на основі диференціальних рівнянь тепло-масообміну.

У статті пропонується для інтенсифікації сушіння сої, з метою отримання олії, проводити надріз поверхні плоду боба. Така процедура призводить до зміни інтенсивності випаровування вологи і, як наслідок, до зниження енерговитрат на процес сушіння.

Запропонована методика побудови математичної моделі процесу зневоднення насіння сої з врахуванням операції попередньої підготовки насінневого матеріалу до сушіння.

Результатом розробленої методики є числовий експеримент на основі отриманої моделі та порівняльний аналіз отриманих даних.

Ключові слова: моделювання, виробництво олії, боби сої, вологість, температура, коефіцієнт розсічення, площа випаровування, ефективний радіус, інтенсифікація процесу сушіння.

Вступ. Проблема енергозбереження у сільському господарстві потребує впровадження нових інноваційних технологій, спрямованих на інтенсифікацію процесів переробки сільськогосподарської продукції [1, 2].

Одним з найбільш енергозатратних процесів у технології виробництва продукції рослинництва є її сушіння [3, 4]. Тому актуальним є дослідження спрямовані на пошук методів сушіння продукції, які б забезпечували швидке та якісне видалення надлишкової вологи при мінімальних енерговитратах.

Раціональні методи сушіння насінневого матеріалу та їх технічна реалізація в загальному випадку визначаються сукупністю теплових, гідродинамічних і механічних

впливів. Існуючі положення загальної теорії тепло- і масопереносу [5-7] в дисперсних середовищах дозволяють виявити і оцінити ефективність нових методів і напрямків інтенсифікації процесу сушіння і теплофізичні ефекти використання різних видів механічних впливів (плющення, подрібнення, руйнування поверхні, тощо) на матеріал.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням кінетики сушіння сільськогосподарських матеріалів, волого- та теплообміну присвячено багато наукових праць [3-7]. Особливої уваги заслуговують дослідження, де інтенсифікувати процес пропонується шляхом попередньої підготовки матеріалу до сушіння. Ця підготовка полягає у розділенні матеріалу на фракції [8], підведенні різних об'ємів сушильного агенту до матеріалу залежно від вологості компонентів [9], поділу на дрібніші частини [10], розпушуванні шару матеріалу [11, 12].

Одним із методів інтенсифікації процесу сушіння насіння бобових є збільшення площі контакту сушильного агенту із матеріалом, що, в свою чергу, дає змогу більш інтенсивно виводити вологу внаслідок втрати цілісності зовнішньої оболонки насінини [13] (рис. 1).

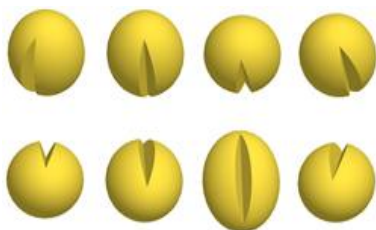


Рис. 1. Загальний вигляд підготовлених до сушіння бобів сої

Досягти такого результату дозволяє пристрій попередньої підготовки матеріалу до сушіння (Патент на корисну модель №87184, Україна) [14].

Мета дослідження полягає у розробці математичної моделі зневоднення насіння бобових (на прикладі сої) з метою обґрунтування енергозберігаючих режимних параметрів сушіння матеріалу в технологічному процесі отримання олії.

Методологія дослідження полягала у використанні сучасних наукових уявлень про кінетику сушіння, що описуються диференціальними рівняннями тепло- і масопродності. Для отримання числових значень вхідних параметрів моделей проводились експериментальні дослідження на розроблених лабораторних установках.

Результати. Для колоїдних матеріалів фільтраційним переносом в процесі сушіння можна знехтувати і температурне поле для тіла у вигляді кулі буде описуватися диференціальним рівнянням [6]:

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\varepsilon r_0}{C} \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau}, \quad (1)$$

з граничними умовами:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial x} + Q + \frac{M_T}{F} (1 - \varepsilon) \cdot r_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} = 0, \quad (2)$$

де r_0 - питома теплота пароутворення, Дж/кг; C - питома теплоємність, Дж/кг $^{\circ}$ С; Q - кількість теплоти, що підводиться до поверхні тіла за одиницю часу, Дж/с; M_T, F - маса і поверхня матеріалу, кг, м 2 ; $\varepsilon = \frac{du_{sun}}{du}$ - локальний коефіцієнт фазового перетворення (доля

парової фази в загальному потоці вологи); $\bar{\varepsilon} = \frac{d\bar{u}_{\text{вмі}}}{d\bar{u}}$ - середньооб'ємний коефіцієнт фазового перетворення.

Кількість підведеного тепла до тіла при конвективному сушінні визначається відповідно до закону Ньютона:

$$Q = \alpha F(t - \theta_n), \quad (3)$$

де α , F - коефіцієнт теплообміну, поверхня матеріалу.

З граничної умови (2) шляхом використання критерію Ребіндера:

$$Rb^0 = \frac{cd\theta}{r_0 du} \quad (4)$$

можна отримати граничні умови III -го роду:

$$-\lambda \frac{d\theta(R, \tau)}{dr} + \alpha_e (t - \theta(R, \tau)) = 0, \quad (5)$$

де $\alpha_e = \alpha \frac{Rb}{Rb + 1}$ - еквівалентний коефіцієнт теплообміну.

Як правило, $\alpha_e < \alpha$, і це зменшує критерій Bi при наявності масообміну в процесі нагрівання. Залежність величини критерія Ребіндера від основних параметрів процесу сушіння можна отримати із балансового рівняння кінетики сушіння:

$$\alpha \cdot S(t_c - \theta_n) = c_u V_3 \rho \frac{d\bar{\theta}}{d\tau} + r_0 V_3 \rho_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (6)$$

де S, V_3 - поверхня і об'єм тіла відповідно, m^2, m^3 ; ρ_0, ρ - густина абсолютно сухого і вологого матеріалу, kg/m^3 ; C_u - питома теплоємність матеріалу у вологому стані: $c_u = m_0 c_0 + m_B c_B$, m_0, m_B - маса сухої речовини і води в тілі, c_0, c_B - питома теплоємність сухої речовини і води, $Dж/кг \cdot ^\circ C$; r_0 - питома теплота пароутворення, $Dж/кг$.

Рівняння (6) вказує на те, що теплота від сушильного агента з температурою t_c , підведена конвективним способом до поверхні F , витрачається на нагрівання тіла і випаровування вологи.

З визначення критерію Ребіндера маємо:

$$d\theta = \frac{r}{c} Rb^0 du. \quad (7)$$

Продиференціювавши рівняння (7) по $\partial\tau$ і підставивши отримане значення в рівняння (6) матимемо:

$$Rb^0 = \frac{\alpha(t_c - \theta_n)}{G_0 r_0 \frac{du}{S \cdot d\tau}} - 1, \quad (8)$$

де $G_0 = V \cdot \rho_0$ - маса сухої частини матеріалу, $кг$; $G_0 \frac{du}{S \cdot d\tau} = m_0$ - інтенсивність волого видалення, $кг/m^2 \cdot сек$; $G_0 du$ - маса води в матеріалі, $кг$.

Другий член правої частини рівняння (1) визначає кількість тепла, витраченого на випаровування вологи, і його можна замінити «негативним» джерелом тепла, так як воно віднімається від тіла. Оскільки швидкість видалення вологи з часом зменшується, то і

потужність «негативного» джерела повинно змінюватися з часом.

Для опису нестационарного поля температури при сушінні боба сої, як динамічну модель нагріву можна використати диференціальне рівняння теплопровідності сферичного тіла (куля) з негативним безперервно діючим джерелом тепла при його конвективному підведені (граничні умови III-го роду). Математично ця задача формулюється [6] так:

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right) + q_0 e^{-K\tau}, \quad (9)$$

$$0-r-R, \quad \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad -\lambda \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial r} + \alpha_c (t - \theta(R, \tau)) = 0, \quad (10)$$

де $q_0 = \frac{\omega_0}{C \cdot \rho}$, $\omega_0 = r_0 \frac{G_0(du/d\tau)}{V}$ - інтенсивність негативного джерела теплоти, Вт/м³;

G_0, V - маса сухої речовини в тілі і його об'єм.

Розв'язок задачі за О. Ликовим запишеться у вигляді:

$$\theta(r, \tau) = \theta_0 + (t_c - \theta_0) \cdot \left[1 - \frac{Po}{Pd} \left(1 - \frac{R \cdot Bi \cdot \sin(\sqrt{Pd} \frac{r}{R})}{r(Bi-1) \sin \sqrt{Pd} + \sqrt{Pd} \cos \sqrt{Pd}} \right) \right] \cdot e^{-PdFo} - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 - \frac{Po}{Pd - (\mu_n)^2} \right) \cdot A_n \cdot \frac{R \sin(\mu_n \frac{r}{R})}{r \cdot \mu_n} \right] \cdot e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (11)$$

де $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$; $Po = \frac{\omega_0 R^2}{\lambda(t_c - \theta_c)}$ - критерій Померанцева; $Pd = \frac{K}{a} R^2$ -

критерій Предводітелева; $Fo = \frac{a}{R^2} \tau$ - критерій Фурьє; a - коефіцієнт теплопровідності, м²/с; R - радіус кулі, м; μ_n - корені характеристичного рівняння.

Розподілу температури за радіусом боба при зміні в часі вказує на те, що сталі значення температури досягаються практично в кінці сушіння. Наявність незначних перепадів температури дає можливість вважати нагрів безградієнтним і замінити в моделюємому об'єкті $\bar{\theta} = \theta_n$ (θ_n - температура поверхні), що значно спрощує подальші дослідження.

Кінетика сушіння боба сої (зміна середньооб'ємного вологовмісту в часі) описується розв'язком рівняння при початкових умовах: $\tau = 0, u = u_0$ (де u_0 - початковий вологовміст):

$$u(\tau) = u_p + (u_0 - u_p) \cdot e^{-K\tau} \quad (12)$$

Продиференціювавши рівняння (12) по $d\tau$ матимемо рівняння нагріву боба сої в процесі сушіння при постійній температурі сушильного агенту t_c :

$$A \frac{d\theta}{d\tau} + \theta = t_c + B \cdot e^{-K\tau}, \quad (13)$$

$$\text{де } A = \frac{CR_v\rho}{\alpha}; B = \frac{r_0R_v\rho_0K(u_0 - u_p)}{\alpha}.$$

Розв'язок рівняння (13) за початкових умов: $\tau = 0; \theta = \theta_0$ (θ_0 - початкова температура) матиме вигляд:

$$\theta(\tau) = t - (t - \theta_0)e^{-\tau/A} + \frac{B^{-1}}{A^{-1} - K}(e^{-K\tau} - e^{-\tau/A}). \quad (14)$$

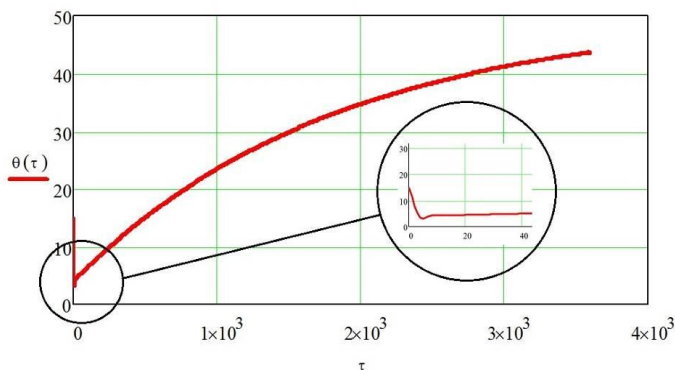


Рис. 2. Рівняння нагріву боба сої в процесі сушіння

Таким чином, можна констатувати, що з урахуванням усіх аспектів, використані моделі досить точно описують процеси сушіння і нагрівання поодиноких бобів сої з урахуванням сучасних уявлень про механізми перенесення тепла і вологи.

Механічне деформування тіла боба сої шляхом розсічення частини поверхні призводить до появи новоутвореної поверхні величиною ΔS . Наявність «нової» додаткової поверхні збільшує повну поверхню боба: $S_n = S + \Delta S$ і, відповідно, приводить до зменшення визначального розміру тіла – гідравлічного радіусу:

$$S_n = \frac{V}{S} = \frac{V}{S + \Delta S}. \quad (15)$$

Приймаючи тіло боба сої за сферичне тіло (кулю), матимемо: $S = \pi \cdot D^2$ - поверхня кулі; $V = \frac{\pi D^3}{6}$ - об'єм кулі; $R_v = \frac{R_k}{3}$ - гідравлічний радіус.

Таким чином, еквівалентний радіус (половина еквівалентного діаметра) буде зменшений при розщепленні боба сої:

$$R_e = 3 \cdot R_v = \frac{3 \cdot V}{S + \Delta S}. \quad (16)$$

Як відомо з теорії сушіння [5, 6], швидкість сушіння матеріалу збільшується при зменшенні визначального радіусу (так як зменшується шлях транспортування вологи від центра до поверхні).

Оцінимо кількісно можливість інтенсифікації сушіння боба сої шляхом деформації його поверхні. Ступінь пошкодження і, відповідно, величину зміни розміру боба запропоновано оцінювати коефіцієнтом розсічення k , який визначається співвідношенням:

$$k = \frac{S_0 + \Delta S}{S_0}, \quad (17)$$

де S_0 - початкова площа, m^2 ; ΔS - площа поверхні надрізу (приріст площі), m^2 .

Еквівалентний (ефективний) радіус боба буде визначатися співвідношенням:

$$R_e = 3 \frac{V}{kS_0}. \quad (18)$$

Кінетика сушіння значною мірою залежить від критеріїв Bi_m і Fo_m . Враховуючи вказані критерії швидкість сушіння можна виразити наступним рівнянням:

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{3\beta}{R_e} \left(1 - 0,025 \frac{\beta \cdot R}{a_m} \right) u_0 - u_p \cdot e^{-\frac{3\beta}{R_e} \tau}. \quad (19)$$

З аналізу рівняння (19) випливає, що зменшення ефективного розміру боба сої призводить до збільшення швидкості сушіння, тобто деформація (розкриття) боба інтенсифікує процес сушіння.

Аналогічним чином можна показати інтенсифікацію процесу нагріву боба сої, так як окрім зменшення критерію F_0 в рівнянні (11) зменшуються критерії Pd і Po .

На рис.3 показано кінетичні криві (криві сушіння) бобів сої при різному ступені пошкодження і цілого боба. Збіжність експериментальних і теоретичних даних для цілого і максимально деформованого боба є задовільною.

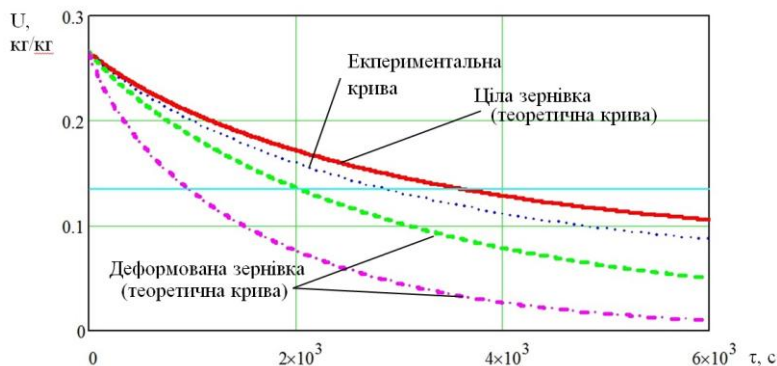


Рис. 3. Криві сушіння зерен сої при різному ступені пошкодження боба

На рис. 4 наведені теоретичні криві нагріву бобів сої в процесі сушіння при різному ступені пошкодження. З графіків можна визначити, що при збільшенні ступеня пошкодження бобів, процес нагріву і стабілізації температури значно прискорюється.

Таким чином, теоретичним аналізом і експериментами доведена можливість інтенсифікації процесу сушіння бобів шляхом механічного розсічення частини поверхні.

При розсіченні боба сої 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 боба. Це призводить до зменшення його температури. Появу «нової» поверхні можна розглядати як наявність в тілі додаткового стоку маси (вологи), або ж джерела видалення вологи з інтенсивністю, яка визначається законом масовіддачі.

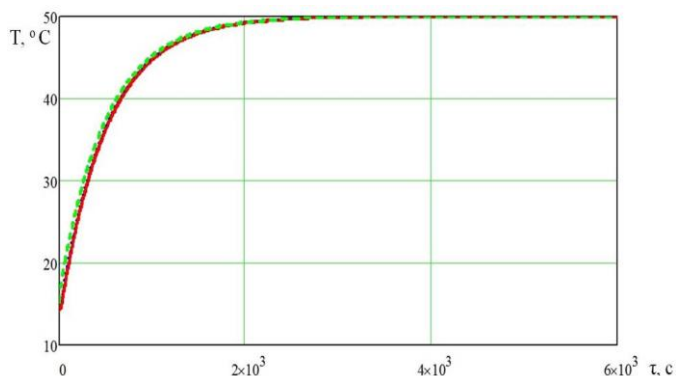


Рис. 4. Графічна залежність розподілу температури за радіусом боба сої в процесі сушіння при різному ступені пошкодження

В якості рушійної сили процесу приймається різниця парціального тиску пари на поверхні і в оточуючому середовищі, а інтенсивність джерела випаровування описується рівнянням Дальтона, величину якої можна позначити:

$$\frac{dG_w}{ds \cdot d\tau} = m(\tau), \frac{\kappa z}{M^2 \cdot c}, \quad (20)$$

де ds - поверхня випаровування, m^2 .

Наявність додаткового джерела вологовидалення призводить до зростання нерівномірності розподілу вологовмісту в об'ємі боба, що спричиняє об'ємно-напружений стан поверхневого шару, результатом якого є деформація тіла (за рахунок усадки колоїдної речовини), а саме «розгортання» зони надрізу, відповідно, зміну ефективного розміру боба і збільшення ефективного площі масообміну.

Оскільки, відповідно до існуючої теорії сушіння [6], величина усушки пропорційна вологовмісту матеріалу, то величину деформації можна визначити так:

$$l = l_0 \cdot \beta_e \cdot u,$$

де l_0 - початковий розмір надрізу; β_e - коефіцієнт лінійної усадки (для зерно продуктів $\beta_e = 1,1 - 1,4$ [6]; u - вологовміст боба, кг/кг. с.р.

Оскільки вологовміст зменшується, то буде зменшуватись і поверхнева зона. Зменшення поверхні боба призводить до розгортання зони надрізу.

Таким чином, для швидкого «розгортання» зони надрізу і збільшення інтенсивності додаткового джерела вологовидалення доцільно прискорити процес сушіння на початковому етапі.

Інтенсивність вологовидалення з відкритої поверхні призводить до висихання поверхні і заглиблення зони випаровування. Інтенсивність додаткового джерела вологовидалення буде з часом знижуватися $m = m(\tau)$.

В граничну умову додамо додаткову складову, яка враховує додаткове джерело вологовидалення:

$$-a_m \rho_0 \left(\frac{du}{dr} \right)_s + \frac{\rho_0 \cdot \beta}{a_m} \left[u - u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} \right] = 0, \quad (21)$$

де m_0 - максимальна інтенсивність вологовидалення.

Величина $u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} = u_m$ - вологовміст «мокрої» поверхні, за аналогією з температурою «мокрого» термометра ($t_m = t_c - \frac{r \cdot m}{\alpha}$) [15].

Таким чином:

$$u(r, \tau) = u_m + (u_0 - u_m) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n \cdot \sin(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n \cdot \mu_n \cdot \frac{r}{R}} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (22)$$

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

При зміні інтенсивності випаровування з відкритої (новоутвореної) поверхні в часі можна, за аналогією із зміною загальної швидкості сушіння, прийняти експоненціальний закон зміни інтенсивності випаровування вологи, а саме:

$$m(\tau) = m_0 \cdot e^{-k\tau}, \quad (23)$$

де m_0 - інтенсивність випаровування на початку процесу, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (максимальна) інтенсивність.

Тоді граничну умову (23) запишемо у такому вигляді:

$$-a_m \rho_0 \frac{du(R, \tau)}{dr} + \beta \cdot \rho_0 [u - u_p] + m_0 e^{-k\tau} = 0. \quad (24)$$

Розв'язок диференціального рівняння масопровідності з граничною умовою (24), аналогічний розв'язку рівняння теплопровідності кулі при наявності негативного джерела тепла (тепло на випаровування поверхні) [7] має вигляд:

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

$$+ \sum_{n=1}^6 \left[1 - \frac{\bar{\theta}_m}{(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2})} \right] \cdot A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m} \quad (25)$$

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 критерія

Предводітелева; $\bar{\theta}_m = \frac{m_0}{\beta(u_0 - u_p)}$ - безрозмірний критерій масообміну.

Зміну середнього вологовмісту в часі можна визначити інтегруванням функції $u(R, \tau)$:

$$u(\tau) = u_p + (u_0 - u_p) \cdot \left[\frac{3 \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m (tg \sqrt{Pd_m} - \sqrt{Pd_m})}{Pd_m \left[Bi_m - 1 \cdot tg \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \right]} \right] \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m} +, \quad (26)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left(1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m},$$

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

Порівнюючи отримані дані, можна бачити, що при наявності додаткової поверхні випаровування поверхневі шари боба висихають швидше, а експозиція сушіння зменшується.

Висновки і перспективи. Для інтенсифікації сушіння зерен сої, в процесі виробництва олії, доцільно застосовувати пристрій попередньої підготовки матеріалу до сушіння. Його дія полягає у розсіченні поверхні боба. Таким чином, утворення «нових поверхонь» випаровування дозволяє підвищити інтенсивність подальшого теплового сушіння на 20...55 % залежно від ступеня розсічення. Для кількісної оцінки інтенсифікації процесу сушіння запропоновано ввести коефіцієнт розсічення, який характеризує приріст площі випаровування та кількісний показник інтенсивності теплообміну - еквівалентний (ефективний) радіус боба. З врахуванням зазначених коефіцієнтів розроблено математичні моделі процесу сушіння бобів сої. Адекватність моделей оцінена відхиленням теоретичних і експериментально отриманих даних в межах 7...10 %.

Список використаних джерел

1. Ващенко В., Бондаренко О. Ресурсозберігаючі технології у рослинництві. *Техніка АПК*. 1999. № 4. С.27-28.
2. Березівський П.С. Напрями інтенсифікації розвитку сільськогосподарських підприємств. *Економіка АПК*. 2009. №6 (174). С.18-25.
3. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис. ... доктора техн. наук: (05.20.01) Глеваха, 1994. 440 с.
4. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів: монографія. Луцьк: ЛДТУ, 2002. 165 с.
5. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Москва : Пищевая промышленность. 1979. 528 с.
6. Лыков А.В. Теория сушки. Москва : Энергия, 1968. 472 с.
7. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва : «Высшая школа», 1967. 599 с.
8. Подоляк В.М. Вдосконалення процесу сушіння вороху льону в нерухомому товстому шарі: дисертація ... канд. техн. наук: (05.20.01) Луцьк, 1999. 204 с.
9. Дударев І.М. Обґрунтування технологічного процесу та параметрів сушарки льоносировини в рулонах: дис. ... канд. техн. наук: (05.05.11). Глеваха, 2007. 208 с.
10. Панасюк С.Г. Обґрунтування параметрів технологічного процесу сушіння качанів кукурудзи : дис... канд. наук: (05.05.11). Вінниця, 2008. 178с.
11. Забродоцька Л. Ю. Обґрунтування технологічного процесу та параметрів сушарки вороху насіння трав : автореф. дис. ... канд. техн. наук : (05.05.11) Кіровоград, 2012. 22 с.
12. Ящук А. А. Обґрунтування параметрів сушарки насіння льону олійного : автореф. дис. ... канд. техн. наук: (05.05.11). Кіровоград, 2014. 20 с.
13. Коpecь К.Є. Розробка та обґрунтування параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння: дис. ... канд. техн. наук : (05.05.11). Львів, 2016. 159 с.
14. Пат. 87184 Україна, МПК. (2013.01) В07В 9/00. Машина для деформації насінневих оболонкок / Р.В.Кірчук, К.Є. Цизь.; заявл.12.08.2013; опубл.27.01.2014.
15. Птицин С.Д. Физические основы влагопереноса в семенах сельскохозяйственных культур. *Труды ВИМ*. 1978. Вып. 35. С. 12–14.

Дата надходження статті до редакції : 11.09.2017
Рецензування 10.10.2017 Прийняття в друк : 14.12.2017

Kirchuk R.V.

PhD, Assosiate Professor
Department of Agricultural Engineering
Machine-building faculty
Lutsk National Technical University
Lutsk, Ukraine
E-mail: ruslan-mail@ukr.net

Didukh V.F.

Dr.Sc. (Technics), Professor
Department of Agricultural Engineering
Machine-building faculty
Lutsk National Technical University
Lutsk, Ukraine
E-mail: didukh_v@ukr.net

Satsyuk V.V.

PhD, Assosiate Professor
Department of Agricultural Engineering
Machine-building faculty
Lutsk National Technical University
Lutsk, Ukraine
E-mail: vs-07 @ukr.net

MODELING OF ENERGY SAVING METHODS OF SOYBEANS DRYING

Abstract

The research is based on the modern scientific believes as to the description of convectional drying on the basis of heat and mass transfer equation.

In order to intensify soy drying process to obtain oil, it is proposed to cut the soy bean surface. Such deformation reduces evaporization intencivity, and energy losses during drying.

The article provides the mathematic model of dewatering of the soy bean taking into account the bean preparation before drying. The result analysis is provided supported with the experimental findings.

Keywords: modeling, oil production, soybeans, moisture, temperature, coefficient of incision, evaporation area, effective radius, intensification of the drying process.

References

1. Vashchenko, V., & Bondarenko, O. (1999). Resursozberihaiuchi tekhnolohii u roslynnystvi. *Tekhnika APK*, 4, 27-28. [in Ukr.]
2. Berezivsky, P.S. (2009). Napriamy intensyfikatsii rozvytku silskohospodarskykh pidpriemstv. *Ekonomika APK*, 6(174), 18-25. [in Ukr.]
3. Kotov, B. I. (1994). *Tehnologicheskie i teploenergeticheskie osnovy povysheniya effektivnosti sushki rastitelnogo syrya. Doctoral thesis.* IMESH, Glevaha. [in Russ.]
4. Didukh, V.F. (2002). Pidvyshchennia efektyvnosti sushinnia silskohospodarskykh roslynnykh materialiv. *Lutsk*. [in Ukr.]
5. Ginzburg, A.S. (1979). *Osnovyi teorii i tehniki sushki pischevyih produktov.* Moscow: Pischevaya promyshlennost. [in Russ.]
6. Lyikov, A.V. (1968). *Teoriya sushki.* Moscow: Energiya. [in Russ.]
7. Lyikov, A.V. (1967). *Teoriya teploprovodnosti.* Moscow: Vysshaya shkola. [in Russ.]

8. Podoliak, V.M. (1999). *Vdoskonalennia protsesu sushinnia vorokhu lonu v nerukhomomu tovstomu shari. Candidate's thesis.* Lutsk STU. Lutsk. [in Ukr.]
9. Dudarev, I.M. (2007). *Obgruntuvannia tekhnolohichnoho protsesu ta parametriv susharky lonosyrovyny v rulonakh. Candidate's thesis.* IMESH, Glevaha. [in Ukr.]
10. Panasiuk, S.H. (2008). *Obhruntuvannia parametriv tekhnolohichnoho protsesu sushinnia kachaniv kukurudzy. Candidate's thesis.* Vinnitsa SAU. Vinnitsa. [in Ukr.]
11. Zabrodotska, L. Yu. (2012). *Obhruntuvannia tekhnolohichnoho protsesu ta parametriv susharky vorokhu nasinnia trav. Candidate's thesis.* Kirovograd NTU. Kirovograd. [in Ukr.]
12. Yashchuk, A. A. (2014). *Obhruntuvannia parametriv susharky nasinnia lonu oliinoho. Candidate's thesis.* Kirovograd NTU. Kirovograd [in Ukr.]
13. Kopets, K.Ie. (2016). *Rozrobka ta obgruntuvannia parametriv prystroiu pidhotovky zeren soi do sushinnia. Candidate's thesis.* Lviv NAU. Lviv. [in Ukr.]
14. Kirchuk, R.V., & Tsyz, K.Ie. *Mashyna dlia deformatsii nasinnievkykh obolonok* [The machine for deformation of seed shells]. *Patent B07B 9/00, no. 87184, 2014.* [in Ukr.]
15. Ptitsin S.D. (1978). *Fizicheskie osnovyi vlagoperenosa v semenah selskohozyaystvennykh kultur. Trudy VIM,35, 12–14.* [in Russ.]

Received: September 11, 2017

Revision: October 10, 2017 Accepted: December 14, 2017