**III. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

УДК: 664.723:633.34

DOI: 10.37128/2520-6168-2019-4-3

**ПРОБЛЕМАТИКА ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ  
МІКРОХВИЛЬОВОГО СУШІННЯ СОЇ**

**Бандура Валентина Миколаївна**, к.т.н., професор  
**Поп'як Олександр Геннадійович**, аспірант  
Вінницький національний аграрний університет

**V. Bandura** – PhD, Professor  
**O. Popiak** – Postgraduate  
Vinnytsia National Agrarian University

*В статті проведено огляд різних методик для математичного моделювання процесу сушіння сої. Метою роботи є розгляд, аналіз та порівняння існуючих підходів для математичного опису процесів переміщення вологи під час мікрохвильового сушіння сої. Єдиним способом, що дозволяє забезпечити виконати математичне моделювання процесів, які відбуваються в зернині сої є комбінація перетворення мікрохвильової енергії в теплоту, нагрівання існуючих в насінні диполів молекул води, процеси переміщення вологи від центра до оболонки зернини і випаровування вологи. На сьогоднішній день мікрохвильове сушіння є одним із перспективних напрямків для досліджень, тому що даний метод є набагато ефективнішим у порівнянні із традиційними методами післязбирального сушіння зерна і водночас недостатньо вивченим. Серед факторів, від яких залежить процес мікрохвильового сушіння можна відзначити: швидкість руху вологи по мікропорам продукту, початкова температура і вологість сировини, розміщення основного магнетрона відносно об'єкту сушіння та швидкість руху сировини в камері сушіння. Об'єктом дослідження в даній статті була спрощена математична модель насіння сої.*

*Для інтенсифікації процесу мікрохвильового сушіння доцільно використовувати комбіновану дію, наприклад обдуванням, завдяки чому зростає інтенсивність та якість процесу мікрохвильового зневоложення. Крім того в цьому випадку можливе одночасне використання двох і більше чинників впливу, що надає можливість для швидкої обробки сировини. Це обумовлює актуальність і перспективи даного дослідження. В роботі обґрунтовано та описано розроблене критеріальне рівняння, яке дозволяє значно спростити складний розрахунок процесів мікрохвильової передачі енергії, нагріванню зразка і швидкості руху в ньому вологи.*

*Розглянуто основні підходи до побудови математичної моделі процесу сушіння сої, визначено їх доцільність. Проведений аналіз різних методик математичного опису процесу сушіння, визначені основні недоліки цих способів. Установлено, що сушіння насіння сої в мікрохвильовому полі є одним з перспективних. Запропоновано математичну модель для комбінованого процесу сушіння сої з поєднанням способів мікрохвильового сушіння і обдуванням його повітрям.*

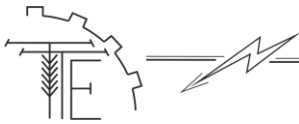
**Ключові слова:** соя, зерно, сушіння, рівняння, середовище, вологість.

**Літ.16.**

**1. Постановка проблеми**

Термообробка матеріалів рослинного походження є найважливішим етапом для більшості технологічних процесів, зокрема, сушки, стерилізації та біостимуляції. Енергетична криза, підвищення цін на енергоносії і збільшення попиту на продукцію високої якості викликали необхідність вдосконалення традиційних технологій і розвитку нових. В цьому напрямку методи термообробки з використанням енергії мікрохвильового електромагнітного поля давно зарекомендували себе як високоєфективні [1]. Застосування мікрохвильового нагрівання визнано доцільним для модернізації ряду технологічних схем виробництва [2-7]. Однак неповнота знань про ефекти впливу мікрохвильового поля на рослинні матеріали не дозволяє переходити на ефективні мікрохвильові технології.

Дослідження процесів взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля з матеріалами рослинного походження, визначення умов обробки, є актуальними завданнями для розвитку ефективних по продуктивності і енергетично раціональних технологій.



## 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нині для сушки зернових найбільш поширені конвективні сушарки, що мають ряд істотних недоліків, які можуть бути частково усунені при використанні мікрохвильово-конвективному підведенні теплоти. Дослідження мікрохвильово-конвективного сушіння картоплі [8] показали, що енерговитрати і тривалість процесу сушки при додатковому мікрохвильовому енергопідведенні скорочуються на 30 % раз у порівнянні з конвективним сушінням. При дослідженні кінетики процесу сушіння зерна гречки [9] отримані переконливі докази застосування мікрохвильових технологій і доцільності розробок мікрохвильових сушарок. У [10] підкреслюється ефективність мікрохвильової обробки для сушки насінного зерна. При сушінні зерна в мікрохвильовому (МХ) полі вдало поєднуються процеси видалення вологи, дезинсекції і дезинфекції [11]. Внутрішні джерела теплоти, що створюються при МХ-нагріванні, призводять до підвищення температури і тиску усередині зерна і до значного прискорення переміщення вологи з середини зерен до їх поверхні [12]. При конвективному, як і при кондуктивному сушінні температура на поверхні зерен вища, ніж усередині, градієнти температури, і, відповідно, тиски перешкоджають переміщенню вологи до поверхні. Нагрівання в МХ полі виконує зворотню дію: температура усередині зерен стає вищою, ніж на поверхні, і градієнти температури і тиску сприяють переміщенню вологи до поверхні, а одночасне продування через шар зерна сушарного агента – її інтенсивному випаровуванню. В результаті швидкість сушки істотно збільшується. Проте дані по кінетиці мікрохвильово-конвективної сушки зернових культур в літературі практично відсутні.

## 3. Мета дослідження

**Метою** досліджень є розгляд, аналіз та порівняння існуючих підходів для математичного опису процесів переміщення вологи під час мікрохвильового сушіння сої.

Для вирішення вказаної мети були поставлені завдання:

- провести аналіз існуючих методів математичного опису процесів переміщення вологи під час сушіння сої;
- визначити найбільш точний і приємливий метод математичного опису;
- обґрунтувати доцільність використання математичної моделі;
- запропонувати найкращий варіант математичної моделі для комбінованого сушіння сої;
- розглянути актуальні проблеми математичного моделювання комбінованого сушіння сої.

## 4. Основні результати дослідження

Одним з поширених підходів до моделювання кінетики сушки є запропонований Шервудом і Люїсом апарат класичної теорії дифузії, ґрунтований на законі Фіка [13]. Вважається, що рух вологи у висушуваному зразку при усій складності механізмів перенесення можна описати рівнянням, яке в декартових координатах має вигляд дифузії:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\delta}{\partial x} \left( D \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де  $D$  – уявний коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

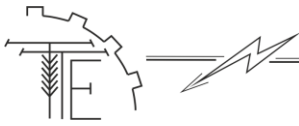
$U$  – вологовміст матеріалу, кг/кг;

$\tau$  – час процесу, с.

Рівняння (1) називається диференціальним рівнянням масопереносу. Проте в загальному випадку зв'язок між  $D$  і  $U$  виражається функцією складного виду з локальними екстремумами, на яку, крім того, впливають фізико-хімічні і структурні зміни в матеріалі, що відбуваються в процесі сушки [13]. Через це визначення швидкості масопереносу у вологих капілярно-пористих колоїдних системах з необхідною для інженерного проектування точністю є ускладненим.

Термодинамічний підхід розглядає перенесення вологи в нерозривному зв'язку з перенесенням теплоти, що дозволяє виявити ефекти накладення і взаємного впливу одного процесу на інший і встановити їх загальні закономірності. При такому підході визначаються кінцеві енергетичні дії рушійних сил, а молекулярна структура речовини і механізм процесу не розглядаються. На основі рівнянь нерівноважної термодинаміки Онзагера, Де-Гроота [13] А.В. Ликовим розроблена теорія волого- і теплопереносу в процесах сушіння, яка є основою для математичного моделювання процесу сушки

При термодинамічному підході до моделювання кінетики сушіння вологі матеріали розглядаються як капілярно-пористі колоїдні системи, переміщення вологи в яких визначається



градієнтами вологовмісту і температури. При цьому користуються феноменологічними законами, що виражають інтенсивність будь-якого потоку енергії або маси у вигляді твору кінетичного коефіцієнта на відповідну термодинамічну силу [11, 12]:

$$\vec{q}_{mk} = \sum L_{ki} \cdot \vec{X}_i, \quad (2)$$

де  $\vec{q}_{mk}$  – потік енергії або маси;

$\vec{X}_i$  – відповідна термодинамічна сила;

$L_{ki}$  – кінетичний коефіцієнт.

При високоінтенсивному процесі сушіння усередині вологого матеріалу виникає градієнт загального тиску вологого повітря. За рахунок цього відбувається додаткове перенесення теплоти і вологи у вигляді гідродинамічного (фільтраційного) руху пари і рідини. Градієнт загального тиску усередині тіла обумовлений інтенсивним випаром рідини і наявністю гідравлічного опору скелета тіла при русі пари. Цьому сприяє наявність мікрокапілярів, через систему яких йде молекулярне (миттєве) натікання повітря з довкілля і дифузія ковзання в системі макрокапілярів [15]. В цьому випадку використовують систему диференціальних рівнянь тепловлагопереносу, запропоновану А.В. Ликовим. Ця система рівнянь описує нестационарний процес тепло- і масопереносу у вологих тілах за будь-яких умов. При постійних значеннях коефіцієнтів перенесення модель представляє систему диференціальних рівнянь виду [13]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 U + k_{12} \nabla^2 T + k_{13} \nabla^2 P, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 U + k_{22} \nabla^2 T + k_{23} \nabla^2 P, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = k_{31} \nabla^2 U + k_{32} \nabla^2 T + k_{33} \nabla^2 P, \quad (5)$$

де  $k_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) – коефіцієнти перенесення, які визначаються з відповідних формул [15].

Проте в загальному випадку диференціальні рівняння (3), (4), (5) є нелінійними. Усі коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього масотеплопереносу є змінними, залежними від вологості і температури матеріалу. Теоретичний аналіз системи рівнянь, який базується на спробі обліку багатьох елементарних видів перенесення, є не можливим через відсутність повноцінних даних про кінетичні коефіцієнти, що входять в диференціальні рівняння і їх граничні умови.

У зв'язку з відсутністю точних аналітичних рішень нелінійних рівнянь для важливих на практиці випадків сушіння на розглянутій теоретичній основі можна отримати лише наближені (орієнтовні) рішення.

Для вирішення завдання перенесення теплоти і маси в умовах діелектричного нагріву харчових продуктів у МХ-полі був проведений аналіз системи диференціальних рівнянь з урахуванням специфіки теплової обробки [16].

Розрахунок процесу перенесення теплоти і маси можна здійснити, використовуючи систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \left( \frac{\varepsilon}{c r} \right) \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial \tau} \right) + \frac{P_{уд}}{c \rho_0}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_{m_2} \nabla^2 U + a_{m_2} \delta_2 \nabla^2 t + \frac{\varepsilon \partial U}{\partial \tau}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 p - \left( \frac{\varepsilon}{c_0} \right) \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial \tau} \right), \quad (8)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення рідина-пара;

$c$  – питома теплоємність зразка;

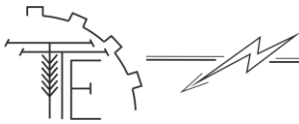
$r$  – питома теплота пароутворення;

$P_{уд}$  – потужність внутрішніх джерел теплоти;

$\rho_0$  – щільність сухої речовини зразка;

$a_{m_2}$  – коефіцієнт дифузії рідини;

$\delta_2$  – відносний коефіцієнт термодифузії;



$a_p$  – коефіцієнт конвективної дифузії;

$p$  – надмірний тиск в зразку;

$c_0$  – місткість зразка по відношенню до вологого повітря.

Виходячи із загальних засад теорії перенесення теплоти і маси, ввівши ряд спрощень, за умови, що глибина проникнення МХ-поля більше товщини зразка, тобто температурний градієнт малий, можна знайти наближене рішення системи (6)...(8). Розглядається одновимірне завдання, в якому зразок вважається напівнескінченим стержнем ( $0 \leq x < \infty$ ). Це означає, що зразок вважається досить довгим і тонким, так що  $d \ll L$ . Під час МХ-нагрівання потужність внутрішнього джерела знижується залежно від відстані від поверхні зразка по експоненціальному закону:

$$\frac{P_{yd}}{c\rho_0} = Ae^{-kx}, \quad (9)$$

де  $A$  – потужність МХ-нагрівача;

$k$  – поглинання МХ-енергії зразком.

Початкові умови мають вигляд:

$$t(x, 0) = t_0; p(x, 0) = 0; U(x, 0) = U_0, \quad (10)$$

де  $U_0$  – величина, незалежна від  $x$ .

Граничні умови між теплоізолюваним зразком і тепловою рівновагою зразка з навколишнім середовищем потрібно прийняти такими:

$$\begin{cases} t(0, \tau) = 0; U(0, \tau) = 0; p(0, \tau) = 0; \\ t_x(0, \tau) = 0; U_x(0, \tau) = 0; p_x(0, \tau) = 0, \end{cases} \quad (11)$$

де індекс  $x$  – означає диференціювання по  $x$ .

Розв'язок системи рівнянь (6)...(8) при граничних умовах (11) з урахуванням експоненціального зниження  $P_{yd}$  від поверхні зразка до центру буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{t}(x, \tau) = \frac{A}{k^2 a} \left\{ \frac{1 - kx}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] - e^{-kx} + \frac{1}{2} e^{ak^2\tau - kx} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{-x}{2\sqrt{a\tau}} \right) + k\sqrt{a\tau} \right] + \right. \\ \left. + \frac{k\sqrt{a\tau}}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2/4a\tau} \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\Phi(\tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\tau e^{-\eta^2} d\eta$ .

Для вологості з урахуванням умов (10) і (11) отримуємо:

$$\bar{U}(x, \tau) = \frac{U_0}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{a'\tau}} \right) \right], \quad (13)$$

де  $a' = \frac{am_2}{1-\varepsilon}$ .

Для тиску з урахуванням умов (10) і (11) отримуємо:

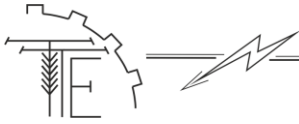
$$p(x, \tau) = \frac{\varepsilon U_0}{2c_0} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{a'\tau}} \right) \right] = p_\infty \left[ 1 - \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{a'\tau}} \right) \right], \quad (14)$$

де  $p$  – граничний надлишковий тиск в зразку.

Проте дане розв'язання отримане для одновимірного середовища (залежність тільки від  $x$ ), тому його використання для опису МХ сушіння призведе до великих похибок. У разі, коли  $d$  є зіставним з  $L$  і зразок є неоднорідним середовищем рішення цього рівняння буде дуже складним тому з низькою точністю буде описувати тепло- і масообмінні процеси, що відбуваються в зразку.

## 5. Висновки

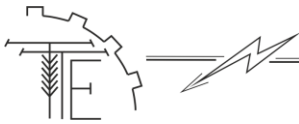
1. Розглянуто різні підходи для побудови математичної моделі процесу сушіння сої при комбінованому тепловому впливі.
2. Визначено, що найбільш ефективним методом для сушіння сої буде метод комбінованої дії: мікрохвильового поля та обдування зразка повітрям.
3. Визначено, що побудова математичної моделі для процесу сушіння насіння сої в мікрохвильовому полі є одним із складних завдань.
4. Запропоновано спрощений варіант математичної моделі для опису процесів переміщення вологи при комбінованому сушінні насіння сої.

**Список використаної літератури**

1. Brodie G., Jacob M. V., Farrell P. Microwave and Radio-Frequency Technologies in Agriculture. An Introduction for Agriculturalists and Engineers. Warsaw/Berlin: Published by De Gruyter, 2015. 396 p.
2. Jayasanka S. M. D. H., Asaeda T. The significance of microwaves in the environment and its effect on plants. *Environmental Reviews*. 2014. Vol. 22, Issue 3. P. 220–228.
3. Li Y., Zhang T., Wu C., Zhang C. Intermittent microwave drying of wheat. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 2014. Vol. 2, Issue 1. P. 32–36.
4. Puligundla P. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013. Vol. 04, Issue 11.
5. Hoogenboom R., Wilms T. F. A., Erdmenger T., Schubert U. S. Microwave-Assisted Chemistry: a Closer Look at Heating Efficiency. *Australian Journal of Chemistry*. 2009. Vol. 62, Issue 3. P. 236.
6. Котов Б. І., Спірін А. В., Зозуляк І. А., Півнюк А. В. Розрахунок кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 1(96). С. 96–99.
7. Бандура В. М., Яровий І. І., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О. Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2018. Т. 82, Вип. 2. С. 123–129.
8. Рудобашта С. В. Осциллирующие режимы в технологиях сушки некоторых растительных материалов. *Тезисы докладов и сообщений : VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену*. Минск, 2008. Т. 1. С. 36–37.
9. Волгушева Н. В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.14.06. Одеса, 2005. 12с.
10. Калинин Л. Г., Сердюк Л. В., Овсянникова Л. К., Орлова С. С. Эффективность использования микроволновой энергии для сушки семенного зерна. *Хранение и переработка зерна*. 1999. №2. С. 9–10.
11. Юсупова Г. Г. Влияние электромагнитного поля СВЧ на микроскопические грибы и их метаболиты. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2003. №12. С. 67–69.
12. Mujumdar A. S., Kudra T. Progress in drying technologies. Boca Raton: CRC Press 2001. V. 7. 459 p.
13. Арапов В. М. Применение методов дериватографии и ЯМР к анализу процессов сушки. *Проблемы процессов и оборудования пищевой технологии : межвуз. сб. науч. тр. СПб:СПб. гос. ун-т низкотемпературн. и пищ. технол.*, 2000. С. 137–143.
14. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых производств. М.: Пищевая пром-сть, 1973. 528 с.
15. Лебедев Д. П., Перельман Т. Л., Тепло- и массообмен в процессах сублимации в вакууме. М.: Энергия, 1973. 336 с.
16. Решетин О. Л., Орлов С. Ю., Теория переноса тепла и влаги в капиллярно-пористом теле. *Журнал технической физики*, 1998. Т. 68. № 2. С. 140–142.

**References**

- [1] Brodie, G., Jacob, M. V., Farrell, P. (2015). *Microwave and Radio-Frequency Technologies in Agriculture*. An Introduction for Agriculturalists and Engineers, Warsaw/Berlin: Published by De Gruyter. [in English].
- [2] Jayasanka, S. M. D. H. (2014). The significance of microwaves in the environment and its effect on plants. *Environmental Reviews*, (22), Issue 3, 220–228. [in English].
- [3] Li, Y., Zhang, T., Wu, C., Zhang, C. (2014). Intermittent microwave drying of wheat. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, (2), Issue 1, 32–36. [in English].
- [4] Puligundla, P. (2013). Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technology*, (4), 11. [in English].
- [5] Hoogenboom R., Wilms, T. F. A., Erdmenger, T., Schubert, U. S. (2009). Microwave-Assisted Chemistry: a Closer Look at Heating Efficiency. *Australian Journal of Chemistry*, (62), Issue 3, 236. [in English].
- [6] Kotov, B. I., Spirin, A. V., Zozuliak, I. A., Pivniuk, A. V. (2017) Rozrakhunok kinetyky sushinnia neodnorodnykh roslynnykh materialiv [Calculation of drying kinetics of inhomogeneous plant materials]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 1(96), 96–99. [in Ukrainian].

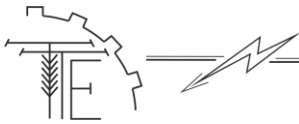


- [7] Bandura, V. M., Yarovy, I. I., Marenchenko, O. I., Pylypenko, Ye. O. (2018). Aparaty dlia sushinnia roslynnoi syrovyny elektromahnitnym polem [Apparatus for drying plant material with an electromagnetic field]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii*, (2), 123–129. [in Ukrainian].
- [8] Rudobashta, S. V. (2008). Ostsilliruyuschie rejimy v tehnologiyah sushki nekotorykh rastitelnykh materialov [Oscillating modes in the drying technologies of some plant materials]. *Tezisy dokladov i soobscheniy : VI Minskiy mejdunar. forum po teplo- i massoobmenu*. (pp. 36–37). Minsk [in Russian].
- [9] Volhusheva, N. V. (2005). *Kinetyka sushinnia shchilnoho sharu dyspersnoho materialu (na prykladi hrechky) pry riznykh sposobakh pidvedennia teploty* [Kinetics of drying a dense layer of dispersed material (on the example of buckwheat) under different methods of supplying heat], (*Extended abstract of Candidate's thesis*). Odesa [in Ukrainian].
- [10] Kalynyn, L. H., Serdiuk, L. V., Ovsianykova, L. K., Orlova, S. S. (1999) Effektivnost ispolzovaniya mikrovolnovoy energii dlya sushki semennogo zerna [Microwave Energy Efficiency for Drying Seeds]. *Hranenie i pererabotka zerna*, 2, 9–10. [in Russian].
- [11] Iusupova, H. H. (2003). Vliyanie elektromagnitnogo polya SVCH na mikroskopicheskie griby i ih metabolity [The influence of the microwave electromagnetic field on microscopic fungi and their metabolites], *Hranenie i pererabotka sel'hozhivirya*, 12, 67–69. [in Russian].
- [12] Mujumdar, A. S., Kudra T. (2001). *Progress in drying technologies*. Boca Raton: CRC Press. [in English].
- [13] Arapov, V. M. (2000). Primenenie metodov derivatografii i YAMR k analizu protsessov sushki [Application of methods of derivatography and NMR to the analysis of drying processes], *Problemy protsessov i oborudovaniya pischevoy tehnologii*: Mezhvuz. sb. nauch. tr. SPb:SPb. gos. un-t nizkotemperaturn. i pisch. tehnol. (pp. 137–143). [in Russian].
- [14] Ginzburg, A. S. (1973). *Osnovy teorii i tehniki sushki pischevyykh proizvodstv* [Fundamentals of the theory and technique of drying food production]. Moscow: Pischevaya prom-st. [in Russian].
- [15] Lebedev, D. P., Perelman, T. L. (1973). *Teplo- i massoobmen v protsessah sublimatsii v vakuume* [Heat and mass transfer in sublimation processes in vacuum] Moscow: Energiya [in Russian].
- [16] Reshetin, O. L., Orlov, S. YU. (1998). Teoriya perenosa tepla i vlagi v kapillyarno-poristom tele [Theory of heat and moisture transfer in a capillary-porous body]. *Jurnal tehnicheckoy fiziki*, 2, 140–142. [in Russian].

#### ПРОБЛЕМАТИКА ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА МИКРОВОЛНОВОЙ СУШКИ СОИ

*В статье проведен обзор различных методик для математического моделирования процесса сушки сои. Целью работы является рассмотрение, анализ и сравнение существующих подходов для математического описания процессов перемещения влаги во время микроволнового сушки сои. Единственным способом, позволяющим обеспечить выполнить математическое моделирование процессов, происходящих в зерне сои является комбинация преобразования микроволновой энергии в теплоту, нагрев существующих в семени диполей молекул воды, процессы перемещения влаги от центра к оболочке зерна и испарения влаги. На сегодняшний день микроволновое сушки является одним из перспективных направлений для исследований, так как данный метод является гораздо более эффективным по сравнению с традиционными методами послеуборочной сушки зерна и одновременно недостаточно изученным. Среди факторов, от которых зависит процесс микроволнового сушки можно отметить: скорость движения воды по микропорам продукта, начальная температура и влажность сырья, размещения основного магнетрона относительно объекта сушки и скорость движения сырья в камере сушки. Объектом исследования в данной статье была упрощена математическая модель семян сои.*

*Для интенсификации процесса микроволнового сушки целесообразно использовать комбинированное действие, например обдувом, благодаря чему возрастает интенсивность и качество процесса микроволнового зневоложения. Кроме того, в этом случае возможно одновременное использование двух и более факторов воздействия, дает возможность для быстрой обработки сырья. Это обуславливает актуальность и перспективы данного исследования. В работе обосновано и описано разработанное критериальное уравнение, которое*



позволяет значительно упростить сложный расчет процессов микроволновой передачи энергии, нагревание образца и скорости движения в нем влаги.

*Рассмотрены основные подходы к построению математической модели процесса сушки сои, определены их целесообразность. Проведенный анализ различных методик математического описания процесса сушки, определены основные недостатки этих способов. Установлено, что сушка семян сои в микроволновом поле является одним из перспективных. Предложена математическая модель для комбинированного процесса сушки сои с сочетанием способов микроволнового сушки и обдувом его воздухом.*

*Ключевые слова: соя, зерно, сушки, уравнения, среда, влажность.*

Лит. 16.

#### PROBLEMATICS OF CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF THE PROCESS OF MICROWAVE DRYING OF SOY

*The article reviews various techniques for mathematical modeling of the soybean drying process. The purpose of this paper is to review, analyze and compare existing approaches to mathematically describe the processes of moisture movement during microwave drying of soybeans. The only way to provide mathematical modeling of the processes occurring in the soybean grain is a combination of the transformation of microwave energy into heat, the heating of dipole water molecules existing in the seed, the processes of moving moisture from the center to the grain shell and evaporation of moisture. Today, microwave drying is one of the promising areas for research, because this method is much more efficient than traditional post-harvest grain drying methods and, at the same time, poorly understood. Factors on which the process of microwave drying depends on are the speed of movement of moisture in the micropores of the product, the initial temperature and humidity of the raw material, the placement of the main magnetron relative to the object of drying and the speed of movement of raw materials in the drying chamber. The object of the study in this article was to simplify the mathematical model of soybean seeds.*

*To intensify the process of microwave drying, it is advisable to use a combined effect, such as blowing, which increases the intensity and quality of the process of microwave dehumidification. In addition, in this case, the simultaneous use of two or more factors of influence, which allows for rapid processing of raw materials. This determines the relevance and prospects of this study. The developed criteria criterion is substantiated and described, which allows to simplify the complex calculation of microwave energy transfer processes, sample heating and moisture velocity in it.*

*The basic approaches to the construction of a mathematical model of the soybean drying process are considered, and their expediency is determined. The analysis of various methods of mathematical description of the drying process is carried out, the main disadvantages of these methods are identified. It is established that drying soybean seeds in the microwave field is one of the most promising. A mathematical model for a combined soybean drying process with a combination of microwave drying methods and air blowing is proposed.*

*Keywords: soybean, grain, drying, equation, environment, humidity.*

Ref. 16.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Бандура Валентина Миколаївна** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [bandura\\_3@ukr.net](mailto:bandura_3@ukr.net)).

**Поп'як Олександр Геннадійович** – аспірант кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008).

**Бандура Валентина Николаевна** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Агроинженерия и технического сервиса» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [bandura\\_3@ukr.net](mailto:bandura_3@ukr.net)).

**Попяк Александр Геннадиевич** – аспирант кафедры «Агроинженерия и технического сервиса» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008).

**Bandura Valentyna Mykolaiivna** – candidate of technical sciences, professor of the department "Agroengineering and technical service" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschaya st., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [bandura\\_3@ukr.net](mailto:bandura_3@ukr.net)).

**Popiak Oleksandr Hennadiiovych** – postgraduate student of the Department of Agroengineering and Technical Services of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008).