

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 664.723.047

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/36>

**Канауз К.О.**

Одеський національний технологічний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ НАСІННЕВОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦІ В РЕЖИМІ ПУЛЬСУЮЧОГО МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ

*Наведені результати експериментальних досліджень кінетики сушіння насінневого зерна пшениці в пульсуючому режимі мікрохвильового нагріву. Вивчається вплив тривалості включення магнетрону та пауз на закономірності зміни температур та вологовмісту матеріалу, швидкість сушіння та питомі енерговитрати. У досліджах фіксують потужність магнетрону, початкові та кінцеві маси та температури, тривалість і кількість включень магнетрону і пауз. В експериментах проводилося дослідження сушіння щільного шару зерна пшениці при середній потужності магнетрону  $P = 300 \text{ Вт}$ ,  $P = 180 \text{ Вт}$  та  $P = 100 \text{ Вт}$ . Аналіз кривих кінетики сушіння показує, що на всіх обраних рівнях потужності можна визначити періоди постійної швидкості сушіння. Збільшення тривалості пауз призводить до зниженню темпу нагрівання та дає можливість отримати придатні для насінневого зерна температурні режими. Отримано, що темп нагрівання вищий для пшениці м'якої, ніж для твердої пшениці. Припускається, що частка вільної води вище у м'якої пшениці, що дозволяє дипольним молекулам води інтенсивно переорієнтуватися в мікрохвильовому полі. Як результат, швидкість сушіння вища для м'якої пшениці в порівнянні з твердою. За результатами обробки експериментальних даних отримана залежність швидкості сушіння від середньої потужності мікрохвильового поля та сорту насіння. Представлені енергетичні характеристики ефективності пульсуючого мікрохвильового сушіння в оптимальному режимі. Проведена оцінка насінневих якостей зерна після сушіння із застосуванням мікрохвильової енергії. Зерно після МХ сушіння в різних режимах та контроль (необроблене зерно) зволожувалося та розташовувалося в камері пророщування, через 3 дні та 7 днів визнаена здатність проростання та енергія схожості насіння. Отриманий режим пульсуючого МХ сушіння, за яким отримуються насінневі характеристики зерна.*

**Ключові слова:** вологовміст, температура, кінетика сушіння, експериментальні дослідження, здатність проростання, енергія схожості.

**Постановка проблеми.** В даний час зростає потреба у високопродуктивних сушарках, які дозволяють у стислий термін і з мінімальними втратами оптимізувати передачу зерна з поля на склад. Розвиток технології сушіння зернових матеріалів, заснованої на застосуванні енергії мікрохвильового поля, здатне привести до певних переваг, зокрема отримати високу енергетичну ефективність та більш однорідний розподіл температури та вологовмісту. Особливо слід виділити проблему сушіння насінневого зерна, що пов'язане з необхідністю отримання необхідної схожості. Тому необхідне проведення експериментальних досліджень, необхідних для визначення раціональних за енергетичними показниками умов процесу та отримання якісного насінневого матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищення схожості насінневого матеріалу зер-

нових та олійних культур в загальнодержавному масштабі дозволить збільшити прибуток від зменшення витрат насінневого матеріалу і суттєвого підвищити врожайність [1]. Проблемі сушіння насінневого матеріалу присвячені праці багатьох дослідників [1–4]. Сушіння повинно знизити вологовміст в насінні до безпечних меж, щоб зберегти його життєздатність під час зберігання, яке в іншому випадку може швидко зіпсуватися через ріст цвілі, нагрівання та активізацію мікробів [3]. Сушіння насіння також дозволяє ранній збір, тривале зберігання насіння, більш ефективне використання землі та робочої сили та отримання високоякісного продукту [4].

Вологість насіння має більший вплив, ніж температура, на довговічність насіння [4]. Загальна залежність полягає в тому, що на кожен відсоток збільшення вологості насіння довговічність

зменшується вдвічі. Це правило стосується насіння з вологістю від 5 до 13 %. При вологовмісті вище 13 %, посилюється процес росту патогенної мікрофлори та спостерігається нагрівання внаслідок дихання, що призводять до швидшого зниження тривалості життя. Коли вологість насіння досягає 18–20 %, посилене дихання і життєдіяльність мікроорганізмів викликають швидке псування насіння. При 30 % вологості більшість насіння проростає. На нижній межі діапазону вологовмісту – від 4 до 5 %, насіння має менший термін служби, ніж насіння, яке зберігається при трохи вищій вологості [6].

Вплив методів сушіння представлено в роботі [6]. Результати показали, що різні методи сушіння мали значний вплив на фізико-хімічні та функціональні властивості ізоляту білка ядра насіння (CPI). Примітно, що порівняно з сублімаційним сушінням (FD) та розпилювальним сушінням (SD), вакуумне сушіння (VD) має більший вплив на колір, гідрофобність поверхні, міжмолекулярні дисульфідні зв'язки, власну флуоресценцію та термічну стабільність (CPI). Мікрохвильовий метод діє набагато швидше, але його потрібно контролювати ретельніше, щоб уникнути перегріву [7]. Експерименти [8] підтверджують можливість інтенсифікації процесу видалення вологи в МХ сушарці насіння пшениці за рахунок створення інтенсивного потоку повітря, нормального до площини шару вологого матеріалу зі швидкостями, характерними для методів фільтраційного сушіння (протягом 3–8 м/с) і параметрами, що відповідають умовам атмосферного тиску. В [9] зразки пшениці з початковим рівнем вологості від 15 до 25 % вологовмісту сушили при щільності потужності МХ поля від 7 до 20 Вт/г протягом 6 хв. Відсоток схожості пшениці зменшувався зі збільшенням щільності МХ потужності при кожній початковій вологості. Прогнозована температура зерна під час сушіння з питомою потужністю 10 Вт/г не перевищувала 65 °С, що вважається безпечним для збереження схожості насіння пшениці. Доведено, що мікрохвильову енергію можна безпечно використовувати для швидшого сушіння насіння пшениці. Стверджується, що комбінація МХ енергії та конвективного сушіння повітрям може усунути недоліки, пов'язані із застосуванням кожного методу окремо [10].

**Постановка завдання.** Метою роботи є отримання даних за кінетику сушіння насіння пшениці при пульсуючому мікрохвильовому підводі енергії та оцінка посівних якостей зерна після сушіння.

## Виклад основного матеріалу Методика проведення експериментів

Схема експериментальної установки та методика обробки експериментальних даних наведені в [11]. При пульсуючому режимі періоди мікрохвильового нагрівання чергуються з паузами. Вивчається вплив тривалості включення магнетрону  $\tau_{MB}$  та пауз  $\tau_n$  на закономірності зміни температур та вологовмісту матеріалу, швидкість сушіння та питомі енерговитрати. У досліджах фіксують потужність магнетрону, початкові та кінцеві маси ( $m_0$ ,  $m_k$ ) та температури ( $t_0$ ,  $t_k$ ), тривалість і кількість включень магнетрону ( $\tau_{MB}$ ,  $n_{MB}$ ) і пауз ( $\tau_n$ ,  $n_n$ ).

Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння зерна пшениці при пульсуючому мікрохвильовому підводі енергії

В експериментах проводилося дослідження сушіння пшениці при середній потужності магнетрону  $P = 300$  Вт,  $P = 180$  Вт та  $P = 100$  Вт. Пульсуючий режим полягав у механізмі підведення мікрохвильової енергії: при  $P = 300$  Вт  $\tau_{MB} = 10$  с, пауза  $\tau_n = 25$  с; при  $P = 180$  Вт  $\tau_{MB} = 5$  с, пауза  $\tau_n = 25$  с; при  $P = 100$  Вт тривалість включення магнетрону  $\tau_{MB} = 3$  с, пауза  $\tau_n = 25$  с. Досліджувалась кінетика сушіння пшениці твердих та м'яких сортів. На рис.1 представлені результати дослідження кінетики сушіння твердої пшениці в залежності від часу і потужності магнетрону.

Аналіз графіків показує, що на всіх обраних рівнях потужності можна визначити періоди постійної швидкості сушіння, причому зниження потужності призводить до більш придатних для насінневого зерна температурним режимам. Зміна вологовмісту носить рівномірний характер. Подібні криві отримані також для дослідження кінетики сушіння пшениці м'якої (рис. 2).

Звертає увагу, що темп нагрівання вищий для пшениці м'якої, ніж для твердої пшениці. Це можна пояснити таким. Незважаючи на однаковий початковий вміст вологи, форма зв'язку вологи може бути різною. Можна припустити, що частка вільної вологи вище у м'якої пшениці, що дозволяє дипольним молекулам води інтенсивно переорієнтуватися в мікрохвильовому полі. Внаслідок цього більша частка мікрохвильової енергії перетворюється на теплову. Як результат, швидкість сушіння виходить вищою для м'якої пшениці в порівнянні з твердою. На рис. 3 наведено графіки швидкості сушіння шару пшениці в залежності від потужності, що підводиться, і сорту зерна.

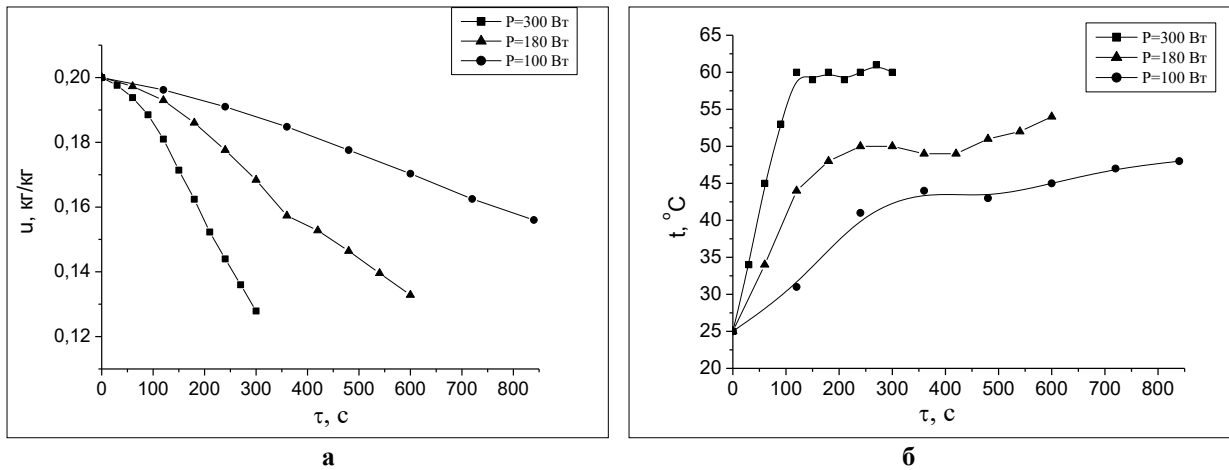


Рис. 1. Кінетика сушіння щільного шару зерна пшениці твердої в пульсуючому режимі МХ сушіння а – зміна вологовмісту в часі, б – зміна температури матеріалу в часі

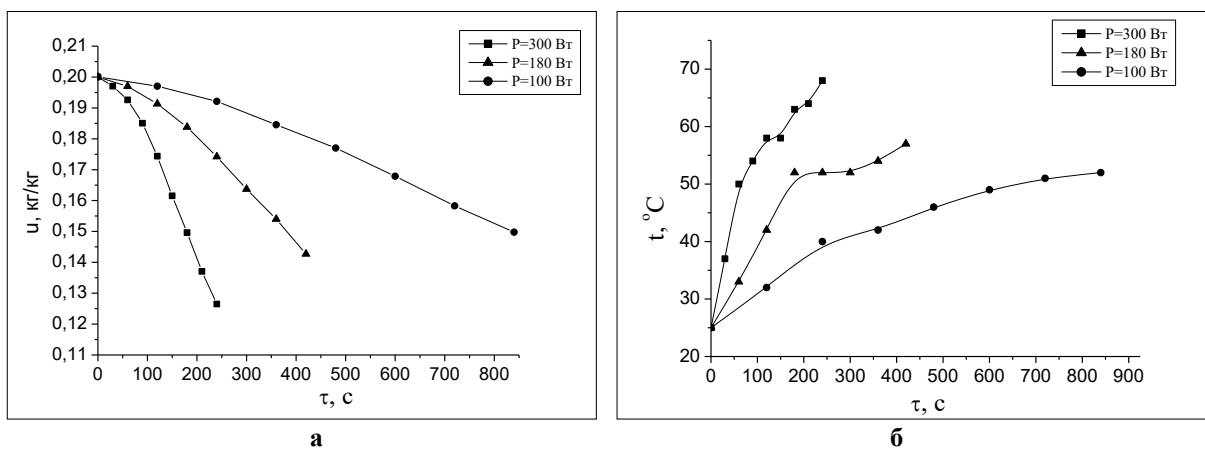


Рис. 2. Кінетика сушіння щільного шару зерна пшениці м'якої в пульсуючому режимі МХ сушіння а – зміна вологовмісту в часі, б – зміна температури матеріалу в часі

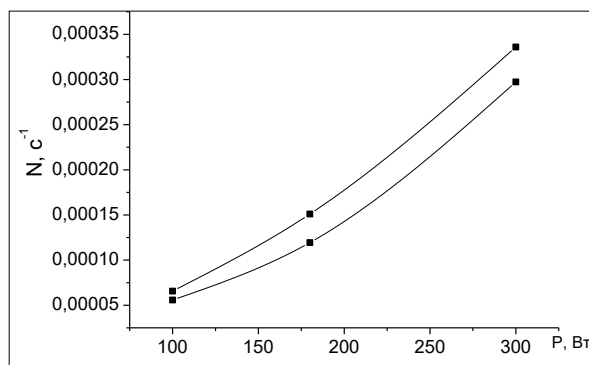


Рис. 3. Залежність швидкості сушіння пшениці м'якої (верхня лінія) та твердої (нижня лінія) від вихідної потужності магнетрону

Видно, що залежність швидкості сушіння від потужності має нелінійний характер. У зазначеному діапазоні параметрів ця залежність може бути представлена у такому вигляді:

$$N = 7 \cdot 10^{-8} \cdot P^{1,486} \cdot \zeta^{-0,356}, \text{ c}^{-1}$$

де  $\zeta$  – характеристика зерна, для м'якої пшениці  $\zeta = 1$ , для пшениці твердої  $\zeta = 2$ .

Похибка емпіричної формули становить 4,2 % у вказаному діапазоні досліджуваних параметрів. Енергетичні характеристики ефективності пульсуючого мікрохвильового сушіння наведені в табл. 1.

Питомі витрати енергії розраховувались на кілограм випарованої вологи.

## Характеристики процесу сушіння при пульсуючій мікрохвильовій сушці зерна пшениці м'якої

Швидкість сушіння, с <sup>-1</sup>	Кінцева температура, °С	Питомі витрати енергії, МДж/кг	Коефіцієнт використання енергії
$3,36 \cdot 10^{-4}$	69,3	7,85	0,63

## Оцінка посівних якостей зерна після сушіння із застосуванням мікрохвильової енергії

Метою експерименту є оцінка впливу МХ сушіння на насінневі якості насіння, провести наочні спостереження і оцінити вплив мікрохвильового нагрівання при різних режимах.

Методика полягала в наступному:

- після обробки відраховується добірне зерно пшениці, а саме 500 штук для кожного режиму;
- відраховується 500 шт необробленого насіння (контроль);
- зерно розміщується в камері пророщування (рис. 3) відповідно режимам обробки та сорту пшениці.

Через 3 дні та 7 днів визначається здатність проростання та енергія схожості насіння.

За результатами спостережень, сушіння насіння при потужності  $P = 300$  Вт (питома потужність 0,3 Вт/г) призводило до відсутності проростання, сушіння насіння при потужності  $P = 180$  Вт (питома потужність 0,18 Вт/г) пригнічувало проростання. При  $P = 100$  Вт (питома потужність 0,1 Вт/г) насіння проростало також саме як контроль.

На наступному етапі визначалися чисельно енергія проростання (третій день) та енергія схожості (на сьомий день). Розрахунки проводились за формулами:

– енергію проростання зерна кожної аналітичної проби ( $X$ ) у відсотках обчислюють за формулою

$$X = \frac{500 - n}{500} \cdot 100 \%,$$

де  $n$  – кількість зерен, не пророслих за 3 доби, шт.; 500 – кількість зерен в аналітичній пробі, шт.

– енергія схожості зерна кожної аналітичної проби у відсотках обчислюють за формулою

$$E_{cx} = \frac{500 - n_1}{500} \cdot 100 \%,$$

де  $n_1$  – кількість зерен, не пророслих за 7 діб, шт.

Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Аналіз таблиці дозволяє стверджувати, що потужність  $P = 300$  Вт неприпустима для сушіння насінневого зерна, тобто питома потужність 0,3 Вт/кг не має бути застосована. Також питома потужність 0,18 Вт/кг призводить до пригнічення проростання насіння. Проте при  $P = 100$  Вт насін-



Рис. 4. Камера для пророщування (вигляд збоку) з підготовленим насінням



а



б

Рис. 5. Зерно в камері для пророщування (а) та насіння (б) на третю добу проростання

Результати розрахунку здатності проростання  $X$  і енергії схожості  $E_{\text{всх}}$  насіння пшениці після МХ сушіння

Пшениця тверда	3-й день від початку гідратації		7-й день від початку гідратації	
	Кількість непророслого насіння, шт	Енергія проростання, %	Кількість непророслого насіння, шт	Енергія схожості, %
P = 300 Вт	486	2,8	485	3,0
P = 180 Вт	270	46	265	47
P = 100 Вт	22	95,6	19	96,2
Контроль	23	95,4	22	95,6
Пшениця м'яка	3-й день від початку гідратації		7-й день від початку гідратації	
	Кількість непророслого насіння, шт	Енергія проростання, %	Кількість непророслого насіння, шт	Енергія схожості, %
P = 300 Вт	488	2,4	487	2,6
P = 180 Вт	288	42,4	285	43
P = 100 Вт	25	95	21	95,8
Контроль	27	94,6	23	95,4

неві якості не погіршувались, навіть спостерігалось незначне підвищення енергії проростання та енергії схожості відносно контролю.

**Висновки.** Збільшення тривалості пауз при пульсуючому мікрохвильовому сушінні призводить до зниженню темпу нагрівання та дає можливість отримати придатні для насінневого зерна температурні режими.

Згідно даним за посівними якостями насіння після сушіння в різних режимах пуль-

суючого мікрохвильового нагріву, МХ потужність  $P = 300$  Вт неприпустима для сушіння насінневого зерна. Також питома потужність  $0,18$  Вт/кг призводить до пригнічення проростання насіння.

МХ потужність  $P = 100$  Вт не призводила до зниження посівних якостей, тому значення питомої потужності  $0,1$  Вт/кг рекомендується до використання в процесах сушіння насінневого зерна.

## Список літератури:

1. Пазюк В. М. Теплотехнічні основи сушіння насінневого зерна – Рукопис : дис. ... доктора технічних наук : 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (144 – Теплоенергетика) / Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, 2019. 41 с.
2. Barrozo M. A. S., Mujumdar A., Freire J. T. Air-Drying of Seeds: A Review. *Drying Technology*. 2014. Vol. 32. № 10. P. 1127–1141. URL: <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.915220>, Sanhewe A. J., Ellis R. H. Seed development and maturation in *Phaseolus vulgaris* L. Post-harvest longevity in air-dry storage. *Journal of Experimental Botany*. 1996. Vol. 47. № 7. P. 959–965. URL: <https://doi.org/10.1093/jxb/47.7.959>.
3. Effects of Drying Methods on the Physicochemical and Functional Properties of Cinnamomum camphora Seed Kernel Protein Isolate / M. Ye et al. *Foods*. 2024. Vol. 13. №6. P. 968. URL: <https://doi.org/10.3390/foods13060968>.
4. Characteristic of Corn drying (*Zea Mays* L) using recirculated column dryer / J. N. W. Karyadi et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 355. P. 012047. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012047>
5. Bewley J. D. Seeds: Physiology of development and germination. New York : Plenum Press, 1985. 367 p.
6. Effects of Drying Methods on the Physicochemical and Functional Properties of Cinnamomum camphora Seed Kernel Protein Isolate / M. Ye et al. *Foods*. 2024. Vol. 13. №6. P. 968. URL: <https://doi.org/10.3390/foods13060968>.
7. Ibragimov M., Eshpulatov N., Matchanov O. Electrical technology of moisture content reduction of industrial-grade cotton seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 883. P. 012135. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/883/1/012135>.
8. Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer / O. Burdo et al. *EUREKA: Life Sciences*. 2019. Vol. 5. P. 70–78. URL: <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2019.001004>.
9. Yıldırım M. The Effect of Drying of Bread Wheat Seeds Following First Water Uptake on Germination Rate. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2018. Vol. № 6. 1. P. 28. URL: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v6i1.28-33.1465>.

10. Microwave Drying Characteristics and Drying Quality Analysis of Corn in China / H. Liu et al. *Processes*. 2021. Vol. 9, no. 9. P. 1511. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091511>.

11. Boshkova I. L., Volgusheva N. V., Kapauz K. O. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF OAT GRAIN DRYING WITH MICROWAVE-CONVECTIVE HEATING. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2, no. 1. P. 40–44. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/07>.

### **Kapauz K.O. STUDY OF WHEAT SEED DRYING IN THE PULSE MICROWAVE HEATING MODE**

*The results of experimental studies of the drying kinetics of wheat seed grain in the pulsating mode of microwave heating are given. The influence of the duration of magnetron activation and pauses on the patterns of changes in temperature and moisture content of the material, drying speed and specific energy consumption is studied. In the experiments, the power of the magnetron, the initial and final masses and temperatures, the duration and number of magnetron activations and pauses are recorded. In the experiments, the drying of a dense layer of wheat grain was studied at the average power of the magnetron  $P = 300\text{ W}$ ,  $P = 180\text{ W}$  and  $P = 100\text{ W}$ . Analysis of the drying kinetics curves shows that periods of constant drying speed can be determined at all selected power levels. An increase in the duration of the pauses leads to a decrease in the heating rate and makes it possible to obtain temperature regimes suitable for the seed grain. It was found that the rate of heating is higher for soft wheat than for hard wheat. It is assumed that the share of free moisture is higher in soft wheat, which allows dipole water molecules to intensively reorient in the microwave field. As a result, the drying rate is higher for soft wheat compared to hard wheat. According to the results of experimental data processing, the dependence of the drying speed on the average power of the microwave field and the seed variety was obtained. The energy characteristics of the effectiveness of pulsating microwave drying in the optimal mode are presented. Evaluation of seed qualities of grain after drying using microwave energy was carried out. The grain after MX drying in different modes and the control (untreated grain) was moistened and placed in the germination chamber, after 3 days and 7 days the germination capacity and energy of seed germination were determined. The resulting mode of pulsating MX drying, according to which the seed characteristics of the grain are obtained.*

**Key words:** moisture content, temperature, drying kinetics, experimental studies, germination capacity, germination energy.