

**ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 66.011:678.055.001.24

**Кінетика мікрохвильового сушіння зерна в нерухомому шарі****Н. В. Волгушева<sup>1</sup>✉, О. П. Угольніков<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна;<sup>2</sup>Військова академія, Фонтанська дорога, 10, Одеса, 65009, Україна✉ e-mail: [natvolgusheva@gmail.com](mailto:natvolgusheva@gmail.com)ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-3007-9285>

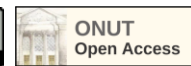
У статті досліджуються процеси сушіння щільного шару зернових культур, таких як пшениця, ячмінь, овес, гречка при мікрохвильовому нагріванні. З метою обґрунтування вибору способу підведення мікрохвильової енергії вивчалось безперервне і переривчасте (осцилююче) підведення за однакових умов. Наведено опис експериментальної установки, що дозволяє проводити дослідження нагріву сипучих матеріалів при мікрохвильовій, мікрохвильово-конвективній та конвективній сушці. Представлено методику оцінки теплового ККД мікрохвильової камери. Встановлено зміну ходу залежності ККД від маси завантаження та вихід на граничне значення, після якого зростання маси не впливає на ККД. Наведено результати дослідження температури та вмісту вологи при сушінні зернових матеріалів у мікрохвильовому полі. Отримано залежності середньоінтегральних вмістів вологи і температур зерна від часу при різних масах зразка. Зі збільшенням маси тривалість процесу при однаковому вологозніманні зростає, а температура матеріалу знижується. Показано, що при мікрохвильовому теплопідведенні спостерігаються періоди прогріву, постійної та падаючої швидкостей сушіння, характерні і за інших способів теплопідведення. На підставі даних про розподіл температур і вмісту вологи в трьох- і чотиришарових зразках розрахований коефіцієнт ослаблення мікрохвильової енергії в шарі. Показана суттєва нерівномірність вмісту вологи і температур за товщиною зразка в умовах вологонепроникної основи експериментального осередку. Наведено результати зіставлення швидкості сушіння, питомих витрат енергії та кінцевих температур шару при мікрохвильовому та пульсуючому мікрохвильовому підведенні енергії. На підставі даних про розподіл температур і вмісту вологи в трьох- і чотиришарових зразках розрахований коефіцієнт ослаблення мікрохвильової енергії в шарі.

**Ключові слова:** Вологовміст; Температура; Коефіцієнт корисної дії; Сушіння; Шар зерна; Спосіб підведення теплоти

**doi:** <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2633>

© The Author(s) 2023. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**1. Вступ**

Вибір у якості об'єктів досліджень зернових культур пояснюється тим, що теплове сушіння є найважливішою та найбільш енергоємною технологічною операцією як при післязбиральній обробці, так і при виробництві круп [1]. У зв'язку з цим удосконалення процесів сушіння зернових культур

є дуже актуальним завданням. Одним із шляхів її вирішення є використання мікрохвильового та мікрохвильово-конвективного теплопідведення [2-3]. У [4] зазначається, що сушіння в мікрохвильовому полі доцільно вести при вмісті вологи близько 20%, що відповідає початковому вмісту вологи зернових.

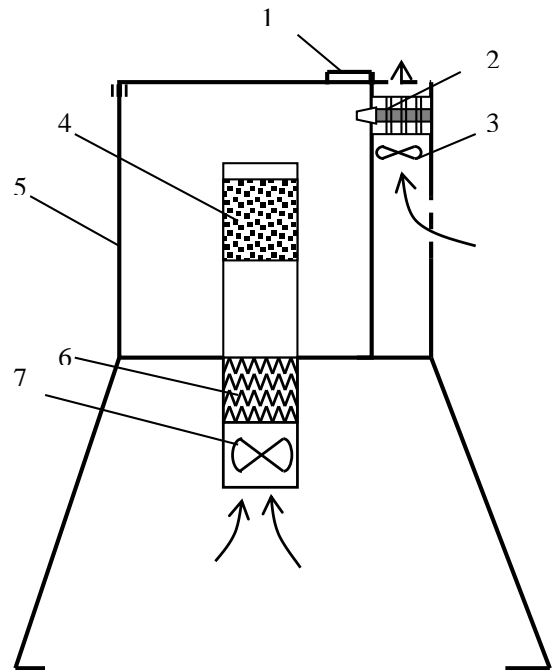
Для створення нових сушильних установок

необхідні відомості про кінетику сушіння за вказаних способів підведення теплоти [5]. В даний час отримані експериментальні дані з кінетики сушіння пшениці, ячменю, вівса, гречки в нерухомому шарі при мікрохвильовому та мікрохвильово-конвективному (одночасному, циклічному) підведенні теплоти [5, 6], узагальнення яких дозволяє масштабувати процеси сушіння та переходити до промислового використання результатів. Як показано в [7], кінетика сушіння є життєво важливою для оптимізації та прогнозування вологовмісту та швидкості сушіння при проектуванні систем сушіння для нових лікарських засобів. Десять напівтеоретичних та емпіричних моделей тонкої кулі було перевірено на їх придатність для представлення даних кінетики сушіння при різних рівнях мікрохвильової потужності. Результати експерименту показали, що ступінь видалення вологи зростає зі збільшенням вихідної потужності мікрохвиль. Потрібно було 35, 24 і 8 хвилин, щоб удалити 90% початкового вмісту вологості при 30, 60 і 90 Вт відповідно. У [8] наведені результати дослідження кінетики конвективного та мікрохвильового сушіння та відповідне математичне моделювання, у роботі враховувалися термодинамічні властивості матеріалу при визначенні споживання енергії. Робота [9] спрямована на експериментальне дослідження сушіння сільськогосподарської продукції за допомогою мікрохвиль, особливо зерна. Експерименти із сушінням у мікрохвильовій печі проводили із зернами неочищеного рису в натурі (різновид BRSMG Conai) для трьох рівнів падаючої мікрохвильової потужності на масу свіжого зерна (6,27, 14,63 та 22,99 Вт/г). Наведено та проаналізовано результати кінетики сушіння та нагрівання зерна. Було підтверджено, що ідеальний середній вміст вологи для зберігання та маркетингу зерна, 15% (db), досягається через 20 хвилин (6,27 Вт/г), 13 хвилин (14,63 Вт/г) та 7 хвилин (22,99 Вт/г), і що рівноважний вміст вологи в зразках досягав 4,4%, 2,7% і 1,9% через 310, 180 і 110 хвилин для кожного з трьох досліджуваних рівнів потужності відповідно. Сушіння з найвищою поглиненою потужністю викликало зміну кольору зерна в кінці процесу сушіння. Аналіз робіт свідчить про важливість дослідження кінетики сушіння зернових матеріалів для визначення доцільності використання мікрохвильового способу сушіння та визначення раціональних умов взаємодії мікрохвильового поля з шаром матеріалу. Метою робо-

ти є оцінка енергетичної доцільності використання мікрохвильового методу сушіння.

## 2. Експериментальна установка та методика проведення експерименту

Досліди проводилися на установці, представленій на рис. 1.



**Рисунок 1** – Схема установки для дослідження кінетики сушіння зернових матеріалів при мікрохвильовому та конвективному нагріванні: 1 – дверцята, 2 – магнетрон, 3 – вентилятор системи охолодження магнетрону, 4 – експериментальний осередок з матеріалом для досліджень, 5 – робоча камера, 6 – електронагрівач, 7 – вентилятор

Основним елементом установки є мікрохвильова камера перетином 0,3x0,2 м, заввишки 0,3 м, До якої надходила через хвилевод енергія від магнетрону з частотою генерації 2,45 ГГц і вихідною потужністю 80-400 Вт. Експериментальні осередки, в які поміщався досліджуваний матеріал, являли собою ємності циліндричної форми, днище та бічні стінки осередків виготовлені з прозорої сітки, забезпечували вільне видалення вологи з шару. Стенд забезпечений системою подачі попередньо підігрітого повітря в мікрохвильову камеру та продування його над шаром або через шар. Осередок з матеріалом з відомою початковою масою і вмістом вологи поміщали в камеру, витримували в ній при певній потужності магнетрону протягом деякого проміжку часу, після чого вимірювали

масу зразка і його температуру в декількох точках по висоті і перерізу. За результатами вимірювань розраховували середньоінтегральні вміст вологи і температуру шару, а також швидкість сушіння. Для визначення характеру зміни зазначених величин у часі з кожним зразком за ідентичних умов проводили серію з 5 – 7 дослідів різної тривалості. У дослідях варіювалася потужність магнетрону, а при комбінованому теплопідведенні також витрата та температура повітря.

### 3. Оцінка теплового ККД мікрохвильової камери

Електрична енергія, що споживається магнетроном із мережі  $N_c$ , частково перетворюється на вихідну енергію  $N_{вих}$ , частина якої поглинається вологим матеріалом. Поглинена енергія витрачається на нагрівання матеріалу та випаровування вологи  $Q_n$ , а також втрачається в процесах його променистого та конвективного теплообміну зі стінками камери та повітрям  $Q_{втр}$ .

Вихідна енергія залежить від ККД магнетрону  $\eta_m$

$$N_{вих} = \eta_m \cdot N_c, \quad (1)$$

а корисний тепловий потік також від ККД камери  $\eta_k$

$$Q_{кор} = N_{вих} \cdot \eta_k = N_c \cdot \eta_k \cdot \eta_m. \quad (2)$$

Значення  $\eta_k$  залежать від конструкції, розмірів та ступеня завантаження камери. На підставі експериментальних даних формули (2) визначався ККД камери при різних масах зразків:  $\eta_k = Q_{кор} / N_{вих}$ . Значення  $Q_{кор}$  розраховувалися по зміні середньоінтегральних вмістів вологи і температур у процесі сушіння. Зі зростанням маси зразка ККД камери зростає, а при  $M > 0,6$  кг мало змінюється (рис. 2).

Залежність ККД камери від ступеня її завантаження (відносини об'єму матеріалу  $V_m$  до об'єму камери  $V_k$ ) описується наступною формулою:

$$\eta_k = 0,56 \left( 1 - \frac{4,63}{5,87 + e^{182V_m/V_k}} \right), \quad (3)$$

справедливою з похибкою  $\pm 1,5$  % при

$$0,005 \leq V_m/V_k \leq 0,15.$$

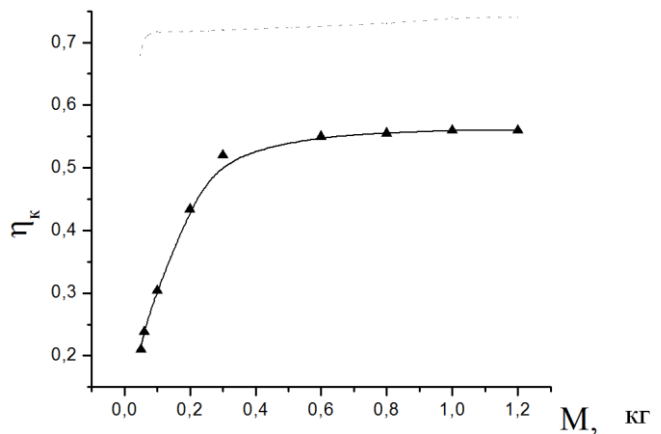


Рис. 2 – Залежність ККД мікрохвильової камери від маси зразка

Розрахунки показали, що збільшення товщини шару за однакової маси (тобто зменшення діаметра зразка) призводить до зростання кількості поглиненої енергії. Теплові втрати зростають із підвищенням маси та вільної поверхні зразка (в умовах дослідів теплові втрати становили 15-30 % від вихідної потужності).

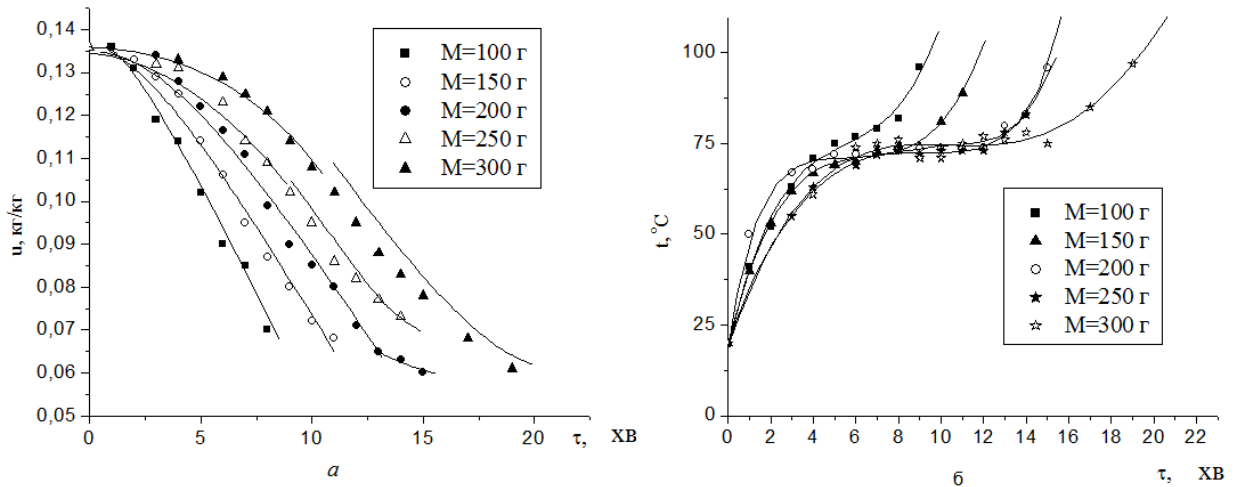
### 4. Результати дослідження сушіння зернових у мікрохвильовому полі

Досліджувалась кінетика сушіння пшениці, ячменю, вівса, гречки. Початковий вміст вологи зерна змінювався від 0,2 до 0,43 кг/кг, початкова температура – від 17 до 26 °С, товщина шару – від 0,008 до 0,07 м, його діаметр – від 0,11 до 0,275 м, площа поверхні, що проникла для пари – від  $8 \cdot 10^{-3}$  до  $94 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, Потужність магнетрону – від 80 до 400 Вт. Досліди проводилися при осцилюючому підведенні мікрохвильової енергії.

На рис. 3 представлені залежності середньоінтегральних вмістів вологи (а) і температур (б) ячменю від часу при різних масах зразка. Зі збільшенням маси тривалість процесу при однаковому вологозніманні зростає, а температура матеріалу трохи знижується. Аналогічні дані отримано й для інших зернових. При мікрохвильовому теплопідведенні спостерігаються періоди прогріву (0), постійної (1) та падаючої (2) швидкостей сушіння, характерні і за інших способів теплопідведення. Характер зміни температур і вмісту вологи в різних перерізах по висоті зразка вивчався на осередку, що складається з трьох шарів, розділених радіопрозорими сітками. Маса кожного шару становила 0,1 кг, товщина – 0,01 м, діаметр – 0,135 м. Бічні поверхні та дно осередку були закриті

алюмінієвою фольгою, що є екраном для мікрохвильової енергії. Таким чином, енергія підво-

дилася, а пара відводилася лише через верхню відкриту поверхню зразка.



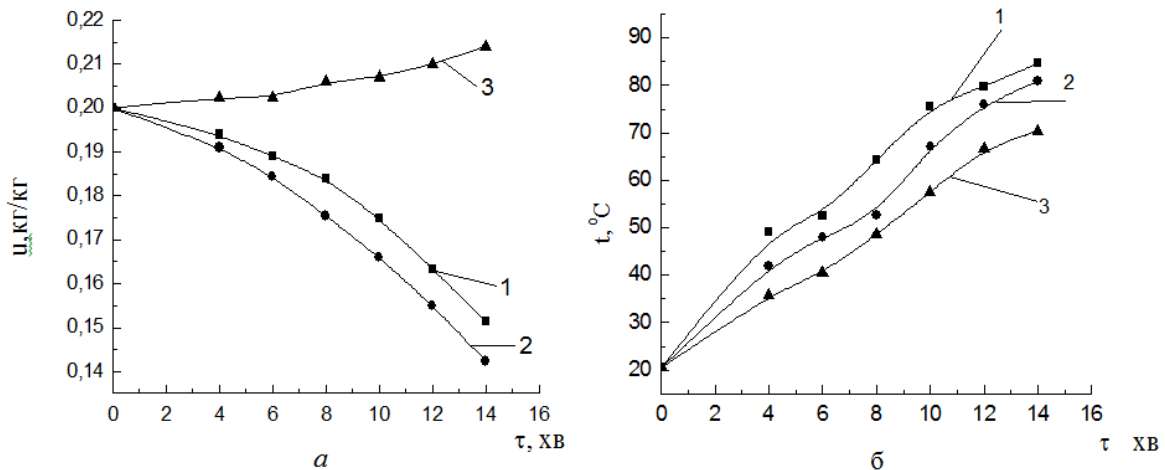
**Рисунок 3** – Зміна вмісту вологи (а) і температури (б) ячменю в залежності від часу сушіння в МХ камері при різних масах зразка

Як видно із рис. 3 температура всіх шарів у часі зростає, причому в нижньому шарі вона мінімальна у зв'язку з ослабленням потоку мікрохвильової енергії. Вологість верхнього і нижнього шарів з часом зменшується, а нижнього – збільшується від початкового значення 0,2 кг/кг до 0,215 кг/кг в результаті фільтрації рідкої вологи з верхніх шарів. Механізм надходження вологи в нижній шар може бути обумовлений дією гравітаційних сил чи термодифузії. Досліди з ізотермічними та неізотермічними шарами свідчать про визначальний внесок термодифузії.

На підставі даних про розподіл температур і вмісту вологи в трьох- і чотиришарових зразках був розрахований коефіцієнт ослаблення мікрохвильової енергії в шарі гречки густиною  $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup> та вологовмістом  $u = 0,18$  кг/кг:  $m = 30$  м<sup>-1</sup>.

Отже, у шарі товщиною близько 0,033 м потік енергії зменшується в  $e$  разів.

Дані наведені на рис. 3, свідчать про суттєву нерівномірність вмісту вологи і температур за товщиною зразка. Практично рівномірний розподіл зазначених параметрів спостерігався при використанні осередка, всі поверхні якого були прозорі і проникні для пари: температури різних шарів розрізнялися не більше, ніж на 4 °С, а вміст вологи – на 0,007 кг/кг. У такому осередку для забезпечення однакового вологознімання потрібно вдвічі менше часу. Дослідні дані свідчать про важливість раціональної організації підведення мікрохвильової енергії до об'єкта сушіння і відведення пари, що утворюється. Всі поверхні, що обмежують його, повинні бути проникними для мікрохвильової енергії і пари.

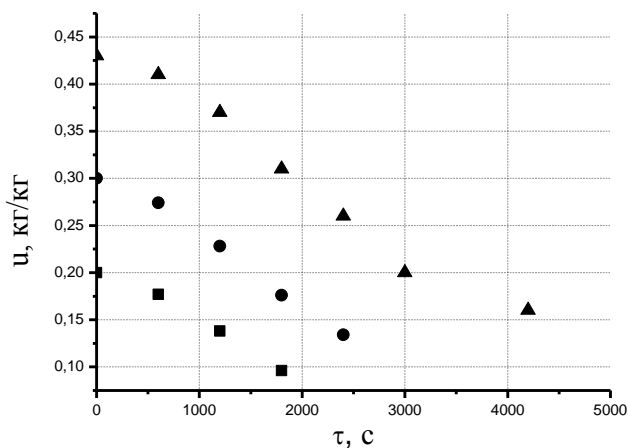


**Рисунок 4** – Криві вмісту вологи (а) і температур (б) для верхнього (1), середнього (2) і нижнього (3) шарів

Основними чинниками, що впливають швидкість мікрохвильової сушіння, є потужність магнетрона і маса зразка. Збільшення потужності та зменшення маси (рис. 4) призводить до інтенсифікації процесу.

Вплив маси при її зміні за рахунок товщини шару при фіксованому діаметрі менше, ніж при зміні діаметра при  $l = idem$ . Так, збільшення товщини шару гречки від 0,008 м до 0,048 м та маси від 0,05 кг до 0,31 кг при  $D = 0,11$  м = *idem*,  $N_c = 160$  Вт призвело до зниження швидкості сушіння від  $2,9 \cdot 10^{-4}$  до  $1,2 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>, тобто у 2,4 рази. Зростання маси в тому ж діапазоні зі збільшенням діаметра шару від 0,11 до 0,276 м при товщині шару  $\delta = 0,08$  м = *idem* викликав зменшення швидкості сушіння від  $2,9 \cdot 10^{-4}$  до  $4,5 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>, тобто у 6,5 разів. Це, мабуть, пояснюється суттєвим зростанням теплових втрат. Отже, доцільно збільшувати масу за рахунок товщини шару. При цьому її граничне значення не повинно перевищувати подвоєну глибину проникнення електромагнітної енергії в шар.

Початковий вміст води зерна на швидкість сушіння практично не впливає. Як видно із рис. 5, темп зміни вологовмісту пшениці при  $u_0 = var$  однаковий.



**Рисунок 5** – Зміна вмісту води зерна пшениці в процесі сушіння. Початкова маса  $m = 300$  г;  
 ▲ –  $u_0 = 0,43$ ; ● –  $u_0 = 0,30$ ; ■ –  $u_0 = 0,20$ ;  
 $N_c = 160$  Вт;  $l = 65$  мм

Дані всіх досліджених матеріалів можуть бути узагальнені як залежності швидкості сушіння від наведеного теплового потоку, тобто відношення корисного теплового потоку (кількості теплоти, що витрачається на нагрівання матеріалу та випаровування з нього води) до маси образця  $q_M = Q_{кор}/M$ , Вт/кг. Залежність описується наступ-

ною емпіричною формулою, що дозволяє розрахувати швидкість сушіння у першому періоді:

$$N_1 = 1,57 \cdot 10^{-7} \cdot q_M^{1,17}, \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Для розрахунку корисного теплового потоку зручно користуватися формулою, яка враховує споживану електроенергію від мережі  $N_c$ , ККД мікрохвильової камери  $\eta_k$  (залежність 3) та ККД магнетрону  $\eta_m$ .

$$Q_{кор} = N_c \cdot \eta_k \cdot \eta_m, \text{ Вт} \quad (5)$$

Для розрахунку середньої температури зерна  $t_1$  у періоді постійної швидкості сушіння (першому періоді) отримана наступна залежність:

$$t_1 = 13,22 \cdot q_M^{0,28}, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Залежності (4, 6) справедливі при  $200 \leq q_M \leq 1285$  Вт/кг з похибкою  $\pm 15\%$  та  $\pm 13\%$ .

Як показали результати досліджень, швидкість МХ сушіння за відсутності перегріву зерна становить  $(0,83-6,1)10^{-4}$  с<sup>-1</sup>, що істотно перевищує значення, отримані за інших способів підведення теплоти. Так, для зерна швидкість кондуктивного сушіння становила  $(0,05-0,33)10^{-4}$  с<sup>-1</sup>, кондуктивно-конвективної – до  $(0,06-0,3)10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Можливість значно інтенсифікувати процес свідчить про перспективність застосування мікрохвильової енергії для сушіння зернових.

Експериментальні дані щодо інтегральних вологовмісту та температури для всіх досліджених матеріалів оброблені у вигляді узагальнених кривих кінетики сушіння та нагріву – залежностей безрозмірних поточних вологовмісту  $u/u_0$  та температури  $t/t_1$  від безрозмірного комплексу  $N_1\tau/u_0$ .

Узагальнені криві вмісту води і температури для ячменю, вівса, гречки і пшениці справедливі при різних початкових вмістах води, підведених потужностях, масах матеріалу. Дані для всіх зернових культур узагальнюються єдиними рівняннями, що описують всі періоди процесу сушіння при  $0,036 \leq N_1\tau/u_0 \leq 0,83$ :

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = 1,016 - 0,332 \frac{N_1\tau}{u_0} - 1,449 \left( \frac{N_1\tau}{u_0} \right)^2 + 1,091 \left( \frac{N_1\tau}{u_0} \right)^3; \quad (7)$$

$$\frac{\bar{t}}{t_1} = 0,511 + 3,506 \frac{N_1\tau}{u_0} - 8,341 \left( \frac{N_1\tau}{u_0} \right)^2 + 7,095 \left( \frac{N_1\tau}{u_0} \right)^3. \quad (8)$$

Формули (7, 8) справедливі із середньоквадратичною похибкою  $\pm 9,8\%$  та  $\pm 11,9\%$  відповідно.

З метою обґрунтування вибору способу підведення мікрохвильової енергії вивчалось безперервне і переривчасте (осцилююче) підведення за однакових умов (потужність магнетрону 600 Вт, матеріал – овес, з початковим вмістом вологи 0,2 кг/кг, масою 0,1 кг). При безперервному підведенні тривалість процесу сушіння становила 30, 60 і 90 с. При осцилюючому підведенні були проведені 3 серії експериментів, що відрізняються тривалістю періодів мікрохвильового підведення  $\tau_{MB} = 30, 60$  та 90 с. У кожній серії тривалість паузи становить  $\tau_n = 20, 40, 60$  та 80 с. В усіх серіях кількість періодів включень магнетронів, тобто сумарні витрати енергії були однаковими. Результати досліджень показали, що при пульсуючому МХ сушінні основна кількість вологи видаляється в періоди підведення МХ енергії, а паузи дозволяють запобігти перегрів матеріалу. При організації таких процесів тривалість періодів підведення МХ енергії повинна бути такою, щоб у їх кінці температура матеріалу не перевищувала рекомендованих технологіями значень, а тривалість пауз такою, щоб температура знижувалася не більше ніж на 3-5 °С. Такий режим дозволяє забезпечити високу швидкість сушіння, помірні енерговитрати та необхідну якість готової продукції.

При безперервному підведенні МХ енергії прийнятним є режим із характеристиками:  $N_c = 600$  Вт,  $\tau_{MX} = 30$  с,  $t_{кон} = 81,7$  °С,  $N = 4,5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>,  $q_M = 15,79$  МДж/кг. У цьому режимі досягнуто досить високої швидкості сушіння при допустимій температурі матеріалу. Підвищення  $\tau_{MX}$ , що дозволяє збільшити швидкість сушіння і зменшити енерговитрати, неприпустимо, так як призводить до перегріву матеріалу.

Набагато сприятливішими показниками характеризується режим з пульсуючим підведенням МХ енергії: за  $N_c = 600$  Вт,  $\tau_{MX\Sigma} = \tau_{n\Sigma} = 60$  с,  $t_{кон} = 80,3$  °С,  $N = 4,4 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>,  $q_M = 8,13$  МДж/кг. При такій же швидкості сушіння витрати енергії при пульсуючому підведенні вдвічі менше, ніж при безперервному.

## 5. Висновки

Збільшення товщини шару за однакової маси (тобто зменшення діаметра зразка) призводить до зростання кількості поглиненої енергії. Теплові втрати зростають із підвищенням маси та вільної

поверхні зразка (в умовах дослідів теплові втрати становили 15 – 30 % від вихідної потужності).

Збільшення товщини шару зерна від 0,008 м до 0,048 м та маси від 0,05 кг до 0,31 кг при  $D = 0,11$  м,  $N_c = 160$  Вт призвело до зниження швидкості сушіння від  $2,9 \cdot 10^{-4}$  до  $1,2 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>, тобто у 2,4 рази. Зростання маси в тому ж діапазоні зі збільшенням діаметра шару від 0,11 до 0,276 м при товщині шару  $\delta = 0,08$  м = *idem* викликало зменшення швидкості сушіння від  $2,9 \cdot 10^{-4}$  до  $4,5 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>, тобто у 6,5 разів. Початковий вміст вологи зерна на швидкість сушіння практично не впливає.

При безперервному підведенні МХ енергії досягнуто високої швидкості сушіння  $N = 4,5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> при допустимій кінцевій температурі матеріалу  $t_{кон} = 81,7$  °С. При пульсуючому МХ сушінні основна кількість вологи видаляється в періоди підведення МХ енергії, а паузи дозволяють запобігти перегріву матеріалу. При організації таких процесів тривалість періодів підведення МХ енергії повинна бути такою, щоб у їх кінці температура матеріалу не перевищувала рекомендованих технологіями значень, а тривалість пауз такою, щоб температура знижувалася не більше ніж на 3-5 °С. Такий режим дозволяє забезпечити високу швидкість сушіння, помірні енерговитрати та необхідну якість готової продукції.

## Особистий внесок авторів CRediТ

**Волгушева Н.В.:** створення методологічних основ роботи, експериментальні дослідження, узагальнення результатів. **Угольників О.П.:** методичне забезпечення, інформаційний пошук, аналіз даних.

## Література

1. Подпрятков Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. – К.: Аграрна освіта, 2014. – 393 с.
2. Бошкова І. Л., Волгушева Н. В., Потапов М. Д. Дослідження явищ теплопровідності при мікрохвильовому сушінні матеріалу // Холодильна техніка та технологія. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 205-210.
3. Волгушева Н. В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) за різних способів підведення теплоти // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06. – Одеса, 2005. – 18 с.

4. **Yang X. H., Tang J.** Advances In Bioprocessing Engineering // World scientific. – 2002. – 184 p.
5. **Rybakov K. I., Semenov V. E.** Microwave heating of electrically conductive materials // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2005. – Vol. 48, No. 10-11. – P. 888–895.
6. **Schiffmann R. F., Mujumdar A.S.** Microwave and Dielectric Drying. Handbook of Industrial Drying. 4rd ed. // Taylor and Francis Group, 2015. – P. 283-303.
7. **Al-Ali M., Parthasarathy R.** Modeling and kinetics study of novel microwave irradiation drying of naproxen sodium drug // Powder Technology. – 2019. – Vol. 345. – P. 766-774.
8. **B.S. Luka et al.** Hot air and microwave drying kinetics of white cabbage (*Brassica oleraceae* L. var *capitata* L.): Modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics // Journal of Agriculture and Food Research. – 2023. – P. 100605.
9. **E.G. Silva et al.** Heat and Mass Transfer on the Microwave Drying of Rough Rice Grains: An Experimental Analysis // Agriculture. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 8.

Отримана в редакції 29.04.2023, прийнята до друку 12.06.2023

## Kinetics of microwave drying of grain in a fixed layer

*Natalya Volgusheva*<sup>1</sup>✉, *Alexander Ugolnikov*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odesa, 65039, Ukraine;

<sup>2</sup>Odesa Military Academy, 10 Fontanska Road, Odesa, 65009, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>natvolgusheva@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-3007-9285>

*Processes of drying a dense layer of grain crops, such as wheat, barley, oats, buckwheat under microwave heating are studied in the article. In order to substantiate the choice of the microwave energy supply method, continuous and intermittent (oscillating) supply was studied under the same conditions. A description of the experimental setup is provided, which allows conducting research on the heating of bulk materials during microwave, microwave-convective, and convective drying. The method of evaluating the thermal efficiency of a microwave chamber is presented. A change in the course of the dependence of the efficiency on the loading mass and the exit to the limit value, after which the increase in mass does not affect the efficiency, have been established. The results of the study of temperature and moisture content during drying of grain materials in a microwave field are given. The dependences of average integrated moisture contents and grain temperatures on time at different sample weights were obtained. With an increase in mass, the duration of the process with the same moisture removal increases, and the temperature of the material decreases. It is shown that during microwave heating there are periods of warm-up, constant and falling drying rates, which are also characteristic of other methods of heating. Based on the data on temperature distribution and moisture content in three- and four-layer samples, the attenuation coefficient of microwave energy in the layer was calculated. Significant non-uniformity of moisture content and temperatures along the thickness of the sample in the conditions of the moisture-proof base of the experimental cell is shown. The results of comparison of drying speed, specific energy consumption and final temperatures of layer with microwave and pulsating microwave energy supply are given. Based on the data on temperature distribution and moisture content in three- and four-layer samples, the attenuation coefficient of microwave energy in the layer was calculated.*

**Keywords:** *Moisture content; Temperature; Efficiency factor; Drying; Grain layer; Heat supply method*

### References

1. **Podpryatov, G.I., Rozhko, V.I., Skaletska, L.F.** (2014). Technology of storage and processing of plant products: a textbook. K.: Agrarian education, 393.
2. **Boshkova, I. L., Volgusheva, N. V., Potapov, M. D.** (2019). Study of heat conduction phenomena during microwave drying of material. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(4), 205-210.
3. **Volgusheva, N.V.** (2005). Kinetics of drying a

- dense layer of dispersed material (on the example of buckwheat) with different methods of heat supply: autoref. thesis ... candidate technical Sciences: 05.14.06. Odesa, 18.
4. **Yang, X. H., Tang, J.** (2002). Advances In Bioprocessing Engineering. *World scientific*, 184.
5. **Rybakov, K. I., Semenov, V. E.** (2005). Microwave heating of electrically conductive materials. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 48(10-11), 888-895.
6. **Schiffmann, R. F.** (2015). Microwave and Dielectric Drying. Handbook of Industrial Dryin., 4rd ed. Taylor and Francis Group, 283-303.
7. Al-Ali, M., Parthasarathy, R. (2019). Modeling and kinetics study of novel microwave irradiation drying of naproxen sodium drug. *Powder Technology*, 345, 766–774.
8. **Luka, B. S., Vihikwagh, Q. M., Ngabea, S. A., McTony, M. J., Zakka, R., Yuguda, T. K., Adnoui, M.** (2023). Hot air and microwave drying kinetics of white cabbage (*Brassica oleraceae* L. var capitata L.): Modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100605.
9. **Silva, E. G., Gomez, R. S., Gomes, J. P., Silva, W. P., Porto, K. Y. N., Rolim, F. D., Carmo, J. E. F., Andrade, R. O., Santos, I. B., Sousa, R. A. A., Diniz, D. D. S., Aragão, M. M. C. A., Lima, A. G. B.** (2020). Heat and Mass Transfer on the Microwave Drying of Rough Rice Grains: An Experimental Analysis. *Agriculture*, 11(1), 8.

---

Received 29 April 2023

Approved 12 June 2023

Available in Internet 30 June 2023