

**ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 51-74:664.723

**Установка для сушки щільного рухомого шару посівного зерна при мікрохвильово-конвективному сушінні***І. Л. Бошкова<sup>1✉</sup>, Н. В. Волгушева<sup>2</sup>, К. О. Канауз<sup>3</sup>, А. П. Гречановський<sup>4</sup>*<sup>1-3</sup>Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна;<sup>4</sup>Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.comORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;<sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0003-2363-8819>; <sup>4</sup><http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

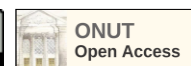
*Розглядається мікрохвильово-конвективна сушарка для посівного зерна як ефективна система сушіння, що дозволяє зменшити споживання енергії. Наголошується, що для оптимальної конструкції та економічно ефективної роботи, а також належного дотримання оптимальних умов зберігання сільськогосподарської продукції, зокрема зернових, доцільно використовувати мікрохвильове нагрівання з одночасним продуванням повітря крізь шар та забезпечити утилізацію теплоти повітря з системи охолодження магнетронів. Визначено, що одною з головних проблем використання мікрохвильового поля для обробки щільних шарів зерна є забезпечення достатньої рівномірності розподілу мікрохвильового поля. Наголошується, що застосування хвилеводів рупорного типу дозволяє здійснити ефективне опромінювання зерна мікрохвильовою енергією. Запропонована схема установки для мікрохвильово-конвективного сушіння зерна, в якій в якості хвилеводів запропоновані рупорні антени, що закриті фторопластовими пластинами для запобігання попаданню водяної пари з робочої камери до хвилеводу. Представлені розрахунки системи охолодження анодних блоків магнетронів та розрахунок камери попереднього підігріву зерна. Гріючим середовищем служить повітря, що продувається через шар у горизонтальному напрямку при швидкості фільтрації 0,14 м/с. На підставі розрахунку робочої камери мікрохвильово-конвективної сушарки з щільним шаром, що рухається з витратою  $G = 1,25 \cdot 10^{-2}$  кг/с, визначена потужність, що споживається з мережі магнетронами з урахуванням ККД мікрохвильової камери, та доцільна кількість магнетронів. При швидкості сушіння  $N = 5,8 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> та за використання трьох магнетронів загальною потужністю 3 кВт питомі витрати на кілограм випареної вологи становитимуть 5,3 МДж/кг. Застосування системи утилізації теплоти у камері попереднього підігріву в 1,3 рази знижує енерговитрати.*

**Ключові слова:** Швидкість сушіння; Температура; Магнетрон; Камера попереднього підігріву; Енергоефективність; Система охолодження

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2822>

© The Author(s) 2024. 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**

Теорія та технологія сушарок досягли значного прогресу, що призвело до розробки різних систем сушіння з різною енергоефективністю та продуктивністю. Енергоспоживання сушарки є

функцією властивостей матеріалу, таких як геометрія та товщина зразка, початковий і кінцевий вміст вологи; питома теплоємність продукту, тип і конфігурація сушарки, робочі параметри, такі як швидкість повітря, температура, щільність потужності, абсолютний тиск, потреба культури в

енергії, час сушіння тощо. Вибір ефективної системи сушіння має першочергове значення, щоб зменшити споживання енергії сушарку при мінімальному впливі на якісні показники продукту. Енергоспоживання сушарки є також важливою технічною характеристикою, необхідною для оптимальної конструкції та економічно ефективної роботи, а також належного дотримання оптимальних умов зберігання сільськогосподарської продукції. У сільськогосподарських сушарках тепло до матеріалу може бути підведено за допомогою конвекції, теплопровідності і випромінювання, або об'ємно, шляхом розміщення вологого матеріалу в мікрохвильовому електромагнітному полі. Більшість промислових сушарок є конвективного типу з гарячим повітрям або прямими газами згорання як середовищем для сушіння. Стверджується [1], що мікрохвильові сушарки дозволяють отримати близько 70% економії енергії в порівнянні з іншими сушарками завдяки їх низькому споживанню енергії при вищій щільності потужності. Проте на даний час бракує мікрохвильово-конвективних сушарок промислового призначення. Метою роботи є розробка та обґрунтування конструкції сушарки для посівного зерна.

## 2. Аналіз перспектив впровадження мікрохвильово-конвективних зерносушарок

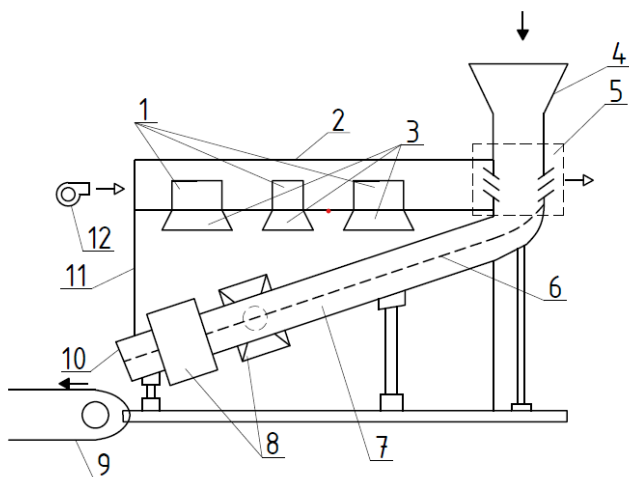
Мікрохвильова конвективна сушка (МКС) набуває все більшого інтересу завдяки своїй унікальній об'ємній здатності нагріву та значно коротшому часу висихання, а також можливості покращення якості кінцевого продукту [2]. Електромагнітна хвиля, що генерується магнетроном, сприяє передачі тепла і, таким чином, видаленню вологи з центру шару матеріалу на поверхню, отже, забезпечує висушування продукту за короткий час і кращою якістю [3]. Авторами [4] визначено, що робота магнетронів на максимальній мікрохвильовій потужності значно скорочує час сушіння, проте застосування імпульсного режиму підведення мікрохвильової енергії більш ефективною, ніж безперервне застосування. Це також підтверджується даними авторів [5]. Мікрохвильове нагрівання насіння знижує вміст вологи та антипоживний фактор із збереженням природного кольору цінного насіння [4]. Мікрохвильове поле успішно використовується для сушіння та знезараження посівного зерна [6]. Автори

стверджують, що використання НВЧ-поля в сушарках призводить до збільшення їх продуктивності і зниження споживаної ними енергії. Проте одна з головних проблем використання мікрохвильового поля для обробки щільних шарів зерна є забезпечення достатньої рівномірності розподілу МХ поля. У статті [6] обговорювалися варіанти конструкції хвилеводів: рупорного, прямокутного і напівкруглого, та наводяться їх порівняльні характеристики. Автори визначили, що застосування хвилеводів рупорного типу в установках конвективно-мікрохвильової обробки дозволяє здійснити досить зручне технологічне обладнання для переробки зерна. При цьому слід забезпечити достатню рівномірність розподілу НВЧ поля на виході, що впливає на ККД установки. Приклад використання рупорних антен в складі мікрохвильового пристрою для обробки рослинних матеріалів в різних технологіях наведено в [7] Запропонована установка дозволяє проводити термообробку рослинних матеріалів різного походження, проте для сушіння зерна вона недостатньо пристосована внаслідок того, що з продуктопроводу вихід вологи утруднений. Сушарки [8, 9] сконструйовані безпосередньо для сушіння зерна, проте вони передбачені для сушіння великих об'ємів зерна та вимагають магнетронів з великою сумарною потужністю. Виникає необхідність в мікрохвильово-конвективних сушарках меншої потужності для невеликих фермерських господарств та для сушіння насінневого зерна. Слід враховувати, що неповне, неправильне та надмірне сушіння має вирішальне значення для якості зерна [10]. Особливі вимоги пред'являються до сушінню посівного зерна. Метою роботи є проектування мікрохвильово-конвективної сушарки для насінневого зерна в об'ємах, які є бажаними для фермерських агрогосподарств.

## 3. Розробка та обґрунтування конструкції сушарки для посівного зерна

### 3.1. Схема установки для мікрохвильово-конвективного сушіння зерна

На підставі аналізу експериментальних даних з кінетики сушіння посівного зерна, отриманих в лабораторних умовах, а також вивчення конструкцій мікрохвильових пристроїв для сушіння [7-9], запропоновано схему установки (рис. 1), що призначена для фермерських господарств.

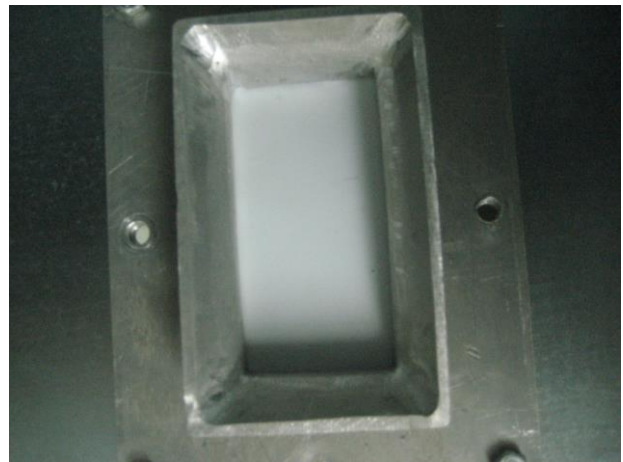


**Рисунок 1** – Схема внутрішнього вигляду мікрохвильово-конвективної сушарки для посівного зерна: 1 – магнетрони; 2 – технологічний відсік; 3 – рупорні антени; 4 – завантажувальний бункер; 5 – камера попереднього підігріву зерна; 6 – радіопрозора сітка для транспортування зерна; 7 – повітропровід; 8 – вентилятори; 9 – транспортерна стрічка для висушеного зерна; 10 – шибера засувка; 11 – корпус установки; 12 – вентилятор для камери попереднього підігріву

Установка працює в такий спосіб. У завантажувальний бункер 4 надходить вологе зерно, яке проходить камеру попереднього підігріву 5 під дією гравітаційних сил і далі потрапляє на прозору сітку 6, розташовану похило, що забезпечує можливість переміщення зерна по сітці. Під сіткою розташований повітропровід 7, до якого надходить повітря від вентиляторів 8. Проходячи через сітку з матеріалом (шар зерна), повітря забезпечує продування шару в напрямку, перпендикулярному руху, що сприяє сушінню зерна за рахунок конвекції і підтримці температури зерна в необхідному температурному діапазоні. Крім того, повітряний потік, створюваний вентиляторами 8, сприяє виникненню рухливості зерен у шарі та їх переміщенню до вихідного отвору, після чого зерно потрапляє на транспортерну стрічку 9. Витрата зерна регулюється шиберами 10. Мікрохвильова енергія генерується магнетронами 1, розташованими в технологічному відсіку 2 і через рупорні антени 3 потрапляє в робочу камеру, де поглинається матеріалом.

Рупорні антени [11] для мікрохвильових установок мають фланці, до яких приєднані хвилеводи. Антени відокремлені від хвилеводів фторопластовими пластинами для запобігання попадан-

ню водяної пари з робочої камери до хвилеводу (рис. 2).



**Рисунок 2** – Вихід антени з фторопластовими пластинами

Хвилеводи розгорнуті один щодо одного на  $90^\circ$ . Рупорні антени, по одній осі, спрямовані на прозору трубу з двох протилежних сторін, щоб забезпечити максимальну напруженість електромагнітного поля всередині робочої камери.

Через технологічний відсік вентилятором 12 продувається повітря, яке, відбираючи теплоту від анодних блоків магнетронів, надходить у камеру попереднього підігріву зерна 5, бічні стінки якої обладнані жалюзіями. Крім того, для охолодження кожного анодного блоку магнетронів передбачено окремий вентилятор, який забезпечує ефективне продування повітря через ребра системи повітряного охолодження (рис. 3).



**Рисунок 3** – Анодний блок магнетрону з ребрами охолодження

Розподіл електромагнітного поля всередині робочої камери завдяки конструктивним особливостям практично рівномірний тому, що викорис-

туються рупорні антени і камера не є резонансною. Зерно під час руху через робочу камеру отримує необхідну для сушіння кількість мікрохвильової енергії. Як генератор мікрохвильового випромінювання були обрані магнетрони UA-M-2 споживаної потужністю 1,0 кВт і робочою частотою 2450 МГц.

Установка також містить блок живлення та управління, який призначений для забезпечення необхідним живленням електродвигунів вентиляторів повітряного охолодження магнетронів та нагнітального вентилятора 12, вентиляторів 8, розташованих на корпусі установки та з'єднаних повітряними радіопрозорими каналами з повітроводом 7; а також для вироблення низьковольтної постійної напруги живлення системи автоматики, керування та захисту установки. Цей блок конструктивно виконаний у вигляді двох відсіків, розділених перегородкою, доступ до яких здійснюється через технологічні люки. В одному відсіку розташований автомат підключення електричного живлення від зовнішньої мережі змінного струму 220V, 50 Гц, який також виконує захисну функцію відключення загального живлення при аварійних ситуаціях або перевантаження. У цьому ж відсіку розташовані:

- випрямляч та стабілізатор напруги для живлення системи автоматики, захисту та управління установки,

- плати оптронів для електричної розв'язки ланцюгів живлення магнетронів та зовнішньої мережі;

- плата запобіжників, що захищає ланцюги живлення високовольтних трансформаторів від короткого замикання та перевантажень. Електричне живлення від зовнішньої мережі підводиться кабелем через роз'єм.

В іншому відсіку розміщено:

- високовольтні трансформатори для забезпечення живлення магнетрону (напруження, анод),

- високовольтний випрямляч з множенням напруги,

- вентилятори для охолодження високовольтних трансформаторів,

- коробчасті повітроводи для стабілізації та спрямування повітряних потоків на трансформатори.

Охолодні потоки повітря подаються до анодів магнетронів по повітроводах і після відпрацювання теплота цих потоків утилізована в камері попереднього підігріву.

Для вибору типу вентилятора, який забезпечує тепловий режим роботи магнетрону, необхідно провести тепловий та аеродинамічний розрахунок.

### 3.2. Система охолодження анодного блоку магнетрону

Анодний блок являє собою металевий товстостінний циліндр круглого перерізу з прорізаними в стінках порожнинами, що виконують роль об'ємних резонаторів, оточених ребрами. Ребра обдуваються повітрям. Радіатор слугуватиме для кращого охолодження.

Розрахунок теплопередачі через циліндричну трубу, оребрену кільцевими ребрами, здійснюється за формулою [12]. Розрахунок теплопередачі через циліндричну трубу, оребрену кільцевими ребрами, здійснюється за формулою [12]:

$$Q = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2}) \cdot F}{\frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha \cdot [1 + E \cdot (k_p - 1)]}} \quad (1)$$

де  $t_{ж1}$  – температура середовища, що оточує стінку, °С;  $\delta_c$  – товщина стінки, м;  $\lambda_c$  – теплопровідність матеріалу стінки, Вт/м·К;  $E$  – коефіцієнт ефективності ребра;  $k_p$  – коефіцієнт оребрення.

За залежністю можна визначити коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{\lambda_c \cdot Q}{(t_{ж1} - t_{ж2}) \cdot F \cdot \lambda_c - Q \cdot \delta_c} - [1 + E \cdot (k_p - 1)], \quad (2)$$

де  $Q$  – тепловий потік;  $Q = 200$  Вт для магнетрону споживаною потужністю 1 кВт. Відповідно до установки, що проектується, коефіцієнт тепловіддачі дорівнює:

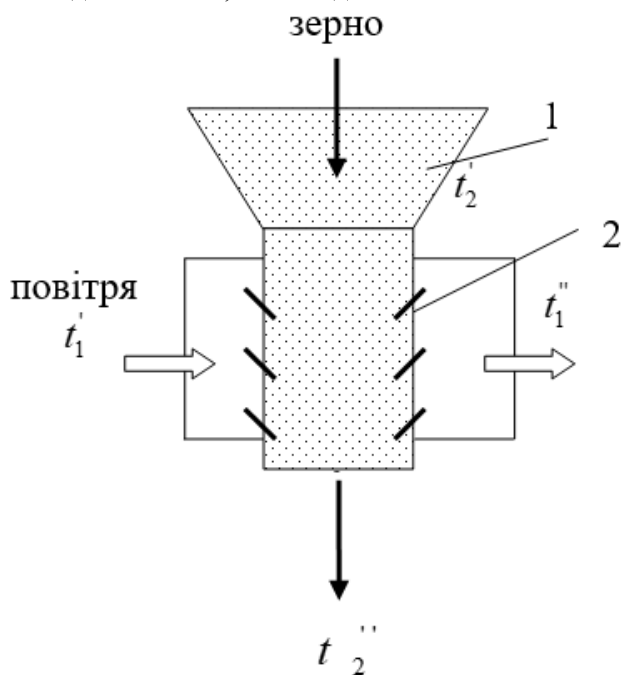
$$\alpha = \frac{45 \cdot 200}{(120 - 20) \cdot 0.00628 \cdot 45 - 400 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} - [1 + 0.71 \cdot (24.99 - 1)] = 18,2 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

Враховуючі літературні дані для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при поперечному обтіканні труби [12], визначена робоча швидкість повітря:  $w = 3,4$  м/с. На підставі аеродинамічного та теплового розрахунків отримані значення необхідного напору та витрати для забезпечення заданого теплового режиму. За цими даними було здійснено вибір вентилятора відцентрового малого

Турбовент ВРМ 108. Максимальна споживана потужність – 35 Вт, вентилятор забезпечує перепад тиску  $\Delta P = 240$  Па.

### 3.3. Розрахунок камери попереднього підігріву зерна

Схема камери попереднього підігріву зерна представлена на рис. 4. Шар зерна рухається у вертикальній шахті прямокутного перерізу під дією гравітаційних сил із витратою  $1,25 \cdot 10^{-2}$  кг/с. Гріючим середовищем служить повітря, що продувається через шар у горизонтальному напрямку при швидкості фільтрації 0,14 м/с. Перетин для продування повітря  $40 \times 35$  см<sup>2</sup>. Температура повітря на вході  $t'_1 = 55$  °С, на виході  $t''_1 = 47$  °С.



**Рисунок 4** – Схема камери попереднього підігріву зерна: 1 – завантажувальний бункер; 2 – жалюзі для виходу пари

До завдань розрахунку входить виконання теплового конструкторського та аеродинамічного розрахунку контактного теплообмінника, призначеного для нагрівання зерна від  $t'_2 = 25$  °С до  $t''_2 = 40$  °С у поперечно продуваному щільному шарі, що рухається. Теплофізичні характеристики пшениці: еквівалентний діаметр зерна пшениці  $d = 3,8$  мм [13], насипна густина  $\rho = 785$  кг/м<sup>3</sup>, теплоємність при вологості 20%  $c_2 = 2,2$  кДж/(кг·К), порізність шару  $\varepsilon = 0,42$ .

Тепловий потік, що отримується зерном:

$$Q = G_2 \bar{c}_2 (t''_2 - t'_2) = 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 2200 \cdot (40 - 20) = 550 \text{ Вт}$$

Середній температурний напір в апараті:

$$\bar{\Delta t} = \bar{\Delta t}_{\text{л}} \varepsilon_{\Delta t} = \frac{(47 - 20) - (55 - 40)}{\ln \frac{(47 - 20)}{(55 - 40)}} \cdot 0,65 = 13,3 \text{ °С}$$

Поправка для перехресного струму  $\varepsilon_{\Delta t} = 0,95$  визначалася за графіками [4.14] залежно від комплексів:

$$P = \frac{\delta t_2}{\Delta t_{\text{max}}} = \frac{40 - 20}{55 - 20} = 0,57 \text{ та}$$

$$R = \frac{\delta t_1}{\delta t_2} = \frac{8}{20} = 0,4$$

Площа поверхні теплообміну:

$$F_m = \frac{Q}{\alpha_m \bar{\Delta t}} = \frac{550}{17 \cdot 13,3} = 2,43 \text{ м}^2$$

Приймається коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну  $\alpha_m = 40$  відповідно до [14] Вт/(м<sup>2</sup>К), що добре корелюється з даними [15].

Питома поверхня частинок в одиниці об'єму шару [15, 16]:

$$a_{y\phi} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_p \cdot \phi} = \frac{6 \cdot (1 - 0,38)}{0,0042 \cdot 1,63} = 543,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

Об'єм теплообмінної ділянки:

$$V_m = \frac{F}{a_{y\phi}} = \frac{2,43}{543,4} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

товщина шару (тобто розмір у напрямку руху газу):

$$\delta = \frac{V_m}{f_2} = \frac{4,4 \cdot 10^{-3}}{0,14} = 0,0314 \text{ м/}$$

Приймаємо  $\delta = 4$  см.

Визначили, що рівняння Ергуна забезпечує найкращу відповідність експериментальним даним за втратами тиску при продуванні потоку газу крізь щільний шар дисперсного матеріалу. Формулу Ергуна (Ергана) [17] на практиці для щільного шару, традиційно використовують ту, яка вимагає врахування інерційних сил в потоці,

що рухається (другий доданок у правій частині рівняння).

Аеродинамічний опір шару:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150\mu_c w (1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75\rho_c w^2 (1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3} = 84,66 \quad (3)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $\rho$  – густина рідини (газу),  $w$  – швидкість потоку,  $H$  – висота шару.

На підставі аеродинамічного розрахунку вибираємо каналний вентилятор, вентилятор Домовент ВКО 100, максимальна потужність якого 14 Вт, продуктивність 94...105 м<sup>3</sup>/год.

### 3.4. Розрахунок мікрохвильово-конвективної сушарки з щільним шаром, що рухається

Методика враховує дані щодо швидкості сушіння з урахуванням продування шару повітрям, отримані в результаті експериментальних досліджень. Мета розрахунку є визначення розмірів сушарки (рис. 1) та потужності, що витрачається на сушіння, до якої входить потужність магнетронів та вентиляторів для повітря, що подається в робочу камеру та технологічний відсік.

Розрахунок ведеться для наступних умов:

- рід дисперсного матеріалу – зерно пшениці;
- продуктивність установки з вологого матеріалу  $G_m = 1,25 \cdot 10^{-2}$  кг/с;
- вологовміст матеріалу на вході  $u_0 = 0,2$  і на виході з сушарки  $u_k = 14$ , кг/кг;
- температура матеріалу на вході до робочої мікрохвильової камери після камери попереднього підігріву  $t_{m0} = 40$  °С;
- максимально допустима температура матеріалу  $t_{max} = 50$  °С [18];
- температура повітря від вентиляторів у робочій камері  $t_{cl} = 20$  °С.
- швидкість руху шару матеріалу в сушарці  $w_m = 0,001$ , м/с;
- температура матеріалу на виході із сушарки  $t_{m2} = 50$  °С.

Попередньо необхідно було визначити товщину шару зерна відповідно до глибини проникнення МХ поля в шар.

Розрахунок глибини проникнення проводився так:

Коефіцієнт ослаблення, м<sup>-1</sup>:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \left[ \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta^2} - 1 \right] \right]^{0,5} = 16,67 \text{ м}^{-1} \quad (4)$$

де  $\lambda_0$  – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі.

Для МХ поля з частотою 2450 МГц  $\lambda_0 = 12,24$  см. Діелектричні характеристики, для яких визначалося значення коефіцієнта ослаблення, відповідали значенням для зерна пшениці при температурі 20 °С і середнім за процес сушіння вологовмістом 0,17 кг/кг, отриманим за методикою [19]:  $\varepsilon' = 7,03$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 0,26$ .

Глибина проникнення:

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} = \frac{1}{2 \cdot 16,67} = 0,03 \text{ м.}$$

Товщина шару приймається рівною глибині проникнення, тому що мікрохвильова енергія поступає до шару зерна від магнетронів тільки зверху.

Визначити швидкість повітря в сушарці, число Рейнольдса:

$$w_z = \frac{G_z}{\rho_z f_2} = 0,2 \text{ , м/с} \quad (4)$$

де  $f_2$  – площа перерізу для проходу повітря в камері сушки, яка дорівнює верхній поверхні повітроводу:  $f = 0,35 \cdot 1,2 = 0,42$  м<sup>2</sup>. Для продування шару зерна обрано два вентилятори "Канальний вентилятор ВЕНТС ВКО 125" продуктивністю 0,051 м<sup>3</sup>/с.

Значення швидкості сушіння для розрахунку часу сушіння  $N = 6,4 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> було прийнято відповідно до власних експериментальних досліджень.

Час сушіння становитиме:

$$\tau = \frac{\Delta u}{N_1} = \frac{0,2 - 0,14}{6,4 \cdot 10^{-5}} = 938 \text{ с.}$$

Довжина сушарки:

$$L = \frac{G_m}{\rho_m \cdot f_m} \cdot \tau = \frac{1,25 \cdot 10^{-2}}{785 \cdot 0,03 \cdot 0,35} \cdot 938 = 1,42 \text{ , м} \quad (6)$$

Об'єм сушарки

$$V_c = f_m \cdot L = 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot 1,42 = 0,0149 \text{ , м}^3 \quad (7)$$

Маса матеріалу в сушарці:

$$M = \rho_m \cdot V_c = 785 \cdot 0,0149 = 11,7 \text{ кг} \quad (8)$$

Корисний тепловий потік, підведений до матеріалу в сушарці від магнетронів:

$$Q_n = G_m \bar{c}_m (t_{m2} - t_{m0}) + \frac{G_m r}{1 + u_0} (u_0 - u_k) = 1754, \text{ Вт} \quad (9)$$

Потужність, що споживається з мережі магнетронами, з урахуванням ККД мікрохвильової камери визначається за формулою:

$$P = \frac{Q_n}{\eta_k \eta_m} = \frac{1754}{0,75 \cdot 0,8} = 2912, \text{ Вт} \quad (10)$$

Приймаємо  $P = 3000$  Вт. Якщо в установці використовувати магнетрони із споживаною потужністю 1 кВт, то знадобиться 3 магнетрони.

#### 4. Оцінка енергетичної ефективності установки для мікрохвильово-конвективного сушіння посівного зерна

Витрати енергії на роботу установки включають витрати на роботу трьох магнетронів  $P_m = 3000$  Вт та роботу вентиляторів  $P_v = 14 + 35 \cdot 3 + 14 \cdot 2 = 147$  Вт.

Система автоматики потребує  $P_a = 150$  Вт. Тоді  $P = 3297$  Вт при швидкості сушіння  $N = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  та витраті матеріалу  $G = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$ . Матеріал знаходиться в сушарці протягом 938 с, маса матеріалу, що знаходиться на стрічці – 11,7 кг (при вмісті вологи  $u = 0,2$ ). Початкова кількість вологи становила  $m_n = 1,95$  кг, кінцева для  $u = 0,14$  становила  $m_k = 1,365$  кг. Тобто в процесі сушіння вийшло 0,585 кг вологи.

За час сушіння витрачається 3,1 МДж. Тоді витрати на кілограм випарованої вологи становитимуть 5,3 МДж/кг.

Тепловий потік, що отримується зерном у камері попереднього підігріву, становить  $Q = 550$  Вт. Таким чином, ця енергія, яку не потрібно підводити до зерна в камері сушіння. Без утилізації теплоти потрібно  $Q_n = 2300$  Вт. У цьому випадку, з урахуванням ККД камери та магнетронів, потрібно було б встановлювати чотири магнетрони, що здорожує вартість установки та енерговитрати. Застосування системи утилізації у камері попереднього підігріву в 1,3 рази знижує енерговитрати.

#### 5. Висновки

Запропоновано схему установки для сушіння

насінневого зерна з витратою по вологому матеріалу  $G = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$  при мікрохвильово-конвективному підведенні теплоти, яка призначена для фермерських господарств.

Розроблено систему повітряного охолодження анодного блоку магнетрону. На підставі аеродинамічного та теплового розрахунків здійснено вибір вентилятора відцентрового малого Турбовент ВРМ 108. Максимальна споживана потужність – 35 Вт,  $\Delta P = 240$  Па.

Визначена доцільність встановлення камери попереднього підігріву зерна у поперечно продуваному щільному шарі, що рухається, призначеної для утилізації теплоти, що відводиться від анодних блоків магнетронів системою повітряного охолодження. На підставі аеродинамічного розрахунку запропонований каналний вентилятор Домовент ВКО 100.

Застосування системи утилізації теплоти в камері попереднього підігріву в 1,3 рази знижує енерговитрати на сушіння насінневого зерна з початковим вмістом вологи 0,2 кг/кг до кінцевого 1,4 кг/кг.

Витрати енергії на кілограм випарованої вологи в запропонованій установці для мікрохвильово-конвективного сушіння становлять 5,3 МДж/кг.

#### Особистий внесок авторів CRediT

**Бошкова І. Л.:** методичне забезпечення, планування роботи. **Волгушева Н. В.:** створення методологічних засад роботи, методики розрахунків, аналіз даних. **Капауз К. О.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків. **Гречановський А.П.:** математична обробка результатів, участь в проведенні розрахунків.

#### Література

1. **Nwakuba, N. R., S. N. Asoegwu, and K. N. Nwagwe.** Energy consumption of agricultural dryers: an overview // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2016. – Vol. 18(4). – P. 119-132.
2. **Kumar C., Karim M. A.** Microwave-convective drying of food materials: A critical review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2017. – Vol. 59. – No. 3. – P. 379-394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>.
3. **Gennadiy I. Churyumov.** Microwave Heating - Electromagnetic Fields Causing Thermal and Non-

- Thermal Effects. – IntechOpen, 2021. – 202 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87921>.
4. **Khodifad B. C., Dhamsaniya N. K.** Drying of Food Materials by Microwave Energy - A Review // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. – 2020. – Vol. 9. – No. 5. – P. 1950-1973. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.223>.
  5. **I. Boshkova et al.** Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 1. – No. 8 (97). – P. 78-85. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154527>.
  6. **Vasilyev, A.A.; Vasilyev, A.N.; Budnikov, D.** Using Modeling to Select the Type of Microwave Field Emitter for Dense-Layer Grain Dryers // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – No. 9070. – P. 1-17.
  7. **I. Boshkova et al.** Testing a microwave device for the treatment of plant materials by various technologies // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 2. – No. 5 (104). – P. 64-71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199816>.
  8. **Календер'ян В.О Волгушева Н.В., Шатравка О.В.** Мікрохвильова сушильна установка (Патент України № 42526). – ОДАХ, 2009.
  9. **Бошкова І. Л., Угольнікова Н. П., Дементьєва Т. Ю, Георгієш К. В.** Мікрохвильова конвективна сушарка для сипких матеріалів (Патент України № u201405855). – ОНАХТ, 2015.
  10. **K. A. Jimoh et al.** Recent Advances in the Drying Process of Grains // Food Engineering Reviews. – 2023. – Vol. 15. – P. 548-576. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7>.
  11. **Rahmat-Samii Y.** Microwave Horn Antennas. Encyclopedia of Remote Sensing. – New York, 2014. – P. 375-382. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9\\_92](https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9_92).
  12. **Avchukhov, V.V. and Payuste, B.Ya.** Problem Book on Heat and mass Transfer for Students. – М.: Energoatomizdat, 1986. – 144 p.
  13. **M. Karimi et al.** The Effect of Moisture Content on Physical Properties of Wheat // Pakistan Journal of Nutrition. – 2008. – Vol. 8. – No. 1. – P. 90-95. <https://doi.org/10.3923/pjn.2009.90.95>.
  14. **Q. Hou et al.** Particle Scale Study of Heat Transfer in Packed and Fluidized Beds // Mesoscale Modeling in Chemical Engineering Part I. – 2015. – P. 193-243. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2015.10.006>.
  15. **Солодка А.В.** Інтенсифікація теплообміну в теплоутилізаторах з гранульованою насадкою. – Автореферат дис. ... канд. техн. наук за фахом 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика". – Одеса: Одеська національна академія харчових технологій, 2017. – 25 с.
  16. **Ghasemi Y., Emborg M., Cwirzen A.** Estimation of specific surface area of particles based on size distribution curve // Magazine of Concrete Research. – 2018. – Vol. 70. – No. 10. – P. 533-540. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00045>.
  17. **Akgiray Ö., Saatçi A.M.** A new look at filter backwash hydraulics // Water supply. – 2001. – Vol.1. – No.2. – P. 65-72. <https://doi.org/10.2166/ws.2001.0022>.
  18. **Пазюк В. М.** Теплотехнічні основи сушіння насінневого зерна. Автореферат дис. ... к.т.н. за спец. 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (144 – Теплоенергетика). – Київ: Інститут технічної теплофізики НАНУ, 2019. – 41 с.
  19. **Stuart O. Nelson.** Microwave Dielectric Properties of Grain and Seed // Transactions of the ASAE. – 1973. – Vol. 16. – No. 5. – P. 0902-0905. <https://doi.org/10.13031/2013.37655>.

Отримана в редакції 06.05.2024, прийнята до друку 03.06.2024

## Unit for drying a dense mobile layer of seed grain with microwave-convective drying

*Iryna Boshkova*<sup>1✉</sup>, *Natalya Volgusheva*<sup>2</sup>, *Kateryna Kapauz*<sup>3</sup>, *Andrii Hrechanovskiy*<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup>Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

<sup>4</sup>National University "Odesa Polytechnic", 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine

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

ORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

<sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0003-2363-8819>; <sup>4</sup><http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

*A microwave-convective dryer for seed grain is considered as an effective drying system that allows reducing energy consumption. It is emphasized that for optimal design and cost-effective operation, as well as proper observance of optimal storage conditions for agricultural products, in particular grain*

products, it is advisable to use microwave heating with simultaneous blowing of air through the layer and to ensure utilization of air heat from the magnetron cooling system. It was determined that one of the main problems of using a microwave field for processing dense layers of grain is to ensure sufficient uniformity of the distribution of the microwave field. It is emphasized that the use of horn-type waveguides makes it possible to effectively irradiate grain with microwave energy. The scheme of the installation for microwave-convective grain drying is proposed, in which horn antennas are proposed as waveguides, closed with fluoroplastic plates to prevent water vapor from entering the working chamber to the waveguide. The calculations of the cooling system of the anode blocks of magnetrons and the calculation of the grain preheating chamber are presented. The heating medium is air blown through the layer in a horizontal direction at a filtration speed of 0.14 m/s. Based on the calculation of the working chamber of a microwave-convective dryer with a dense layer moving with a flow rate of  $G = 1,25 \cdot 10^{-2}$  kg/s, the power consumed from the network by magnetrons, taking into account the efficiency of the microwave chamber, and the appropriate number of magnetrons are determined. At the drying rate  $N = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  and using three magnetrons with a total power of 3 kW, the specific consumption per kilogram of evaporated moisture will be 5.3 MJ/kg. The use of a heat recovery system in the preheating chamber reduces energy consumption by 1.3 times.

**Keywords:** Drying speed; Temperature; Magnetron; Preheating chamber; Energy efficiency; Cooling system

## References

1. **Nwakuba, N. R., S. N. Asoegwu, & K. N. Nwaigwe.** (2016) Energy consumption of agricultural dryers: an overview. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(4), 119-132.
2. **Kumar, C., & Karim, M. A.** (2017) Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 379-394.
3. **Gennadiy I. Churyumov** (2021) Microwave Heating – Electromagnetic Fields Causing Thermal and Non-Thermal Effects. *IntechOpen*, 202 .
4. **Khodifad, B. C., & Dhamsaniya, N. K.** (2020) Drying of Food Materials by Microwave Energy – A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(5), 1950-1973.
5. **Boshkova, I., Volgusheva, N., Titlov, A., Titar, S., & Boshkov, L.** (2019) Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8 (97)), 78-85.
6. **Vasilyev, A.A.; Vasilyev, A.N.; & Budnikov, D.** (2023) Using Modeling to Select the Type of Microwave Field Emitter for Dense-Layer Grain Dryers. *Applied Sciences*, 13, 9070, 1-17.
7. **Boshkova, I., Volgusheva, N., Boshkov, L., Potapov, M., Kolesnychenko, N., Demianchuk, B., & Lapkin, O.** (2020) Testing a microwave device for the treatment of plant materials by various technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(5 (104)), 64-71.
8. **Kalender"yan V.O, Volgusheva N.V, Boshkova I.L, & Shatravka O.V.** (2009) Microwave drying unit. Patent of Ukraine No. 42526. *OSAR*.
9. **Boshkova I. L., Uhol'nikova N. P., Dement'yeva T. YU, & Heorhiyesh K. V.** (2015) Microwave convective dryer for loose materials. Patent of Ukraine No. u201405855. *ONAFI*.
10. **Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Man, H. C., Jahari, M., & Onwude, D. I.** (2023) Recent Advances in the Drying Process of Grains. *Food Engineering Reviews*, 15, 548-576.
11. **Rahmat-Samii, Y.** (2014) Microwave Horn Antennas. *Encyclopedia of Remote Sensing. Springer: New York*, 375-382.
12. **Avchukhov, V.V., & Payuste, B.Ya.** (1986) Problem Book on Heat and mass Transfer for Students. *M.: Energoatomizdat*, 144.
13. **Karimi, M., Kheiralipo, K., Tabatabaee, A., Khoubakht, G. M., Naderi, M., & Heidarbeig, K.** (2008) The Effect of Moisture Content on Physical Properties of Wheat. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(1), 90-95.
14. **Hou, Q., Gan, J., Zhou, Z., & Yu, A.** (2015). Particle Scale Study of Heat Transfer in Packed and Fluidized Beds. *Mesoscale Modeling in Chemical Engineering Part I*, 193-243.
15. **Solodka, A.V.** (2017) Intensification of heat exchange in heat exchangers with a granular nozzle. Abstract of the thesis ... Ph.D for special 05.14.06 – Technical thermophysics and industrial thermal ener-

---

gy. *Odesa: Odesa National Academy of Food Technologies*, 25.

16. **Ghasemi, Y., Emborg, M., & Cwirzen, A.** (2018) Estimation of specific surface area of particles based on size distribution curve. *Magazine of Concrete Research*, 70(10), 533-540.

17. **Akgiray, Ö., & Saatçı, A. M.** (2001) A new look at filter backwash hydraulics. *Water Supply*, 1(2), 65-72.

18. **Pazyuk, V. M.** (2019) Thermotechnical basics of seed grain drying. Abstract of the thesis ... Ph.D for

special 05.14.06 – Technical thermophysics and industrial thermal energy. *Kyiv: Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences*, 41.

19. **Nelson, Stuart O.** (1973) Microwave Dielectric Properties of Grain and Seed. *Transactions of the ASAE*, 16(5), 0902-0905.

---

Received 06 May 2024

Approved 03 June 2024

Available in Internet 30 June 2024