

**Бошкова І.Л.**

Одеський національний технологічний університет

**Волгушева Н.В.**

Одеський національний технологічний університет

**Канауз К.О.**

Одеський національний технологічний університет

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНА ВІВСА ПРИБІ МІКРОХВИЛЬНО-КОНВЕКТИВНОМУ ПІДВОДІ ЕНЕРГІЇ

*Досліджуються циклічні режими мікрохвильово-конвективного сушіння нерухомого шару зерен вівса. Проведено аналіз публікацій за темою досліджень сушіння із застосуванням енергії мікрохвильового поля та його комбінацією з конвективним сушінням. Встановлено перспективність сушіння із застосуванням мікрохвильової енергії, однак для створення відповідних технологій бракує відомостей щодо швидкості сушіння та обґрунтованості вибору раціонального способу підведення теплоти. Сформульовано завдання отримання даних за швидкостями сушіння зерна при циклічному мікрохвильово-конвективному підведенні теплоти та вибору раціонального режиму за значеннями питомих (на кілограм випареної вологості) витрат енергії. Представлена схема експериментальної установки, яка дозволяє вивчити вплив тривалості продування та температури повітря на закономірності зміни температур і вмісту вологи матеріалу, швидкість сушіння та питомі енерговитрати. Наведено методику проведення експерименту та основні залежності для обробки експериментальних даних. Проведено аналіз результатів експериментів під час продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву та нагрітому до 50°C. Тривалість циклів продування шару зерна становила 10, 20 і 30 с, тривалість мікрохвильового нагріву для всіх дослідів дорівнювала 10 с. Отримано значення швидкості сушіння для періодів мікрохвильового та конвективного підведення енергії, а також середніх значень швидкості сушіння для кожного дослідів. Проведено порівняльний аналіз швидкостей сушіння для періодів як мікрохвильового нагріву, так і конвективного при різній тривалості циклів продування. Отримано результати розрахунків питомих витрат енергії за різних умов циклічного сушіння. Визначено умови отримання мінімальних питомих витрат енергії (на кілограм випарованої вологи) та максимальної швидкості сушіння.*

**Ключові слова:** циклічні режими, щільний шар, експериментальна установка, тривалість продування, температура, вологовміст, швидкість сушіння, питомі витрати енергії.

**Постановка проблеми.** Найбільш енергоємною технологічною операцією при післязбиральній обробці зерна є теплове сушіння. В даний час для сушіння зернових зазвичай використовуються конвективні сушарки, що мають ряд недоліків, які можуть бути частково усунені при переході на мікрохвильово-конвективний спосіб підведення теплоти. Як показує сучасна практика, спроби створення нового обладнання, зокрема, з використанням енергії мікрохвильового поля без попереднього дослідження кінетики сушіння не призводили до бажаного результату. Основою для конструювання нових установок є залежності для розрахунку температури та вмісту вологості дисперсного матеріалу в процесі сушіння, що є предметом дослідження даної роботи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Свіжозібране зерно необхідно висушити до вологості

14% або менше протягом 48 годин, щоб запобігти проростанню та псуванню [1]. Більшість досліджень просушування зерна проводяться в лабораторних умовах для вивчення факторів, які визначають якість зерна при переході на великі масштаби. До таких факторів належать температура та потік повітря, товщина шару зерна, склад сировини та використовувана система сушіння [2]. Дослідження МХ-конвективного сушіння зерна [3] показали, що тривалість процесу сушіння за наявності осцилюючого мікрохвильового енергопідведення скорочується в 3,5 рази порівняно з конвективним сушінням. При дослідженні кінетики сушіння зерна отримано переконливі докази доцільності застосування мікрохвильових технологій та доцільності розробок мікрохвильових сушарок [4, 5].

У [6] підкреслюється необхідність вивчення кінетики сушіння для подальшого прогнозування вологовмісту та швидкості сушіння при проектуванні промислових сушарок. Порівняльна оцінка кінетики конвективного та мікрохвильового сушіння наведена у [7], результати свідчать про доцільність використання мікрохвильової енергії. Експериментальне дослідження сушіння зерен неочищеного рису [8] у мікрохвильовому полі показало перспективність мікрохвильового способу сушіння, авторами визначені раціональні умови взаємодії мікрохвильового поля з шаром матеріалу. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про інтерес до розробки технологій сушіння зернових матеріалів за використання мікрохвильової енергії, проте для створення відповідних технологій бракує відомостей щодо швидкості сушіння та обґрунтованості вибору раціонального способу підведення теплоти.

**Метою роботи** є отримання даних за швидкостями сушіння зерна при циклічному мікрохвильово-конвективному підведенні теплоти та обґрунтування вибору раціонального режиму за значеннями питомих (на кілограм випареної вологості) витрат енергії.

**Виклад основного матеріалу. Експериментальна установка та методика проведення експериментів**

Схему експериментальної установки представлено на рис. 1. Установка забезпечує проведення досліджень при мікрохвильовому, мікрохвильово-конвективному та конвективному сушінні. У середині робочої камери встановлений повітропровід з радіопрозорого матеріалу, в який поміщалася комірочка, виготовлена у формі паралелепіпеда з радіопрозорого сітчастого матеріалу. Розміри осередку відповідали розмірам повітроводу, щоб при продуванні матеріалу повітрям не відбувалося бічних перетікань.

Вивчається вплив тривалості продування  $\tau_k$ , а також температури повітря, що продуває шар, на закономірності зміни температур і вмісту вологи матеріалу, швидкості сушіння і питомі енерговитрати. При цьому тривалість включення магнетрону  $\tau_{MX}$  у всіх дослідках була однаковою. При продуванні ненагрітим повітрям проводяться 3 серії дослідів, що відрізняються тривалістю  $\tau_k$ . Після кожного кроку проводиться зважування матеріалу і вимірювання температури шару в декількох точках, потім в комірочку засипається нова порція матеріалу з тією ж вагою і вмістом вологи, і дослід проводиться з тривалістю, більшою на наступний період (MX або продування). Таким чином,

отримані вихідні дані дозволяють визначити спад вологи і середню температуру шару, а також розрахувати вміст вологи, питомі витрати енергії після кожного з періодів. Кожен дослід закінчується паузою. У дослідках вимірюють початкові та кінцеві маси ( $m_0, m_k$ ) та температури ( $t_0, t_k$ ) та тривалість продування ( $\tau_k$ ).

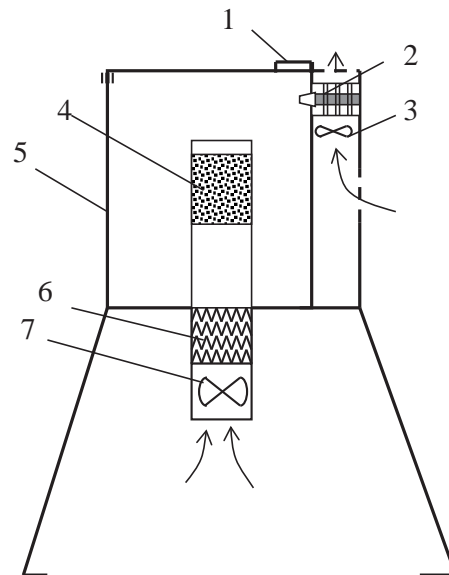


Рис. 1. Схема установки для дослідження кінетики сушіння зернових матеріалів [4]

1 – дверцята, 2 – магнетрон, 3 – вентилятор системи охолодження магнетрону, 4 – експериментальна комірочка з матеріалом для досліджень, 5 – робоча камера, 6 – електронагрівач, 7 – вентилятор

У мікрохвильову установку завантажувалося 0,1 кг зерна з початковим вмістом вологи 0,2 кг/кг. Сушіння зерна проходило в циклічному режимі – періоди MX нагрівання чергувалися з періодами продування. Тривалість періоду MX нагріву у всіх дослідках була однаковою і становила 10 с, потужність магнетрону 600 Вт. Тривалість періоду продування була 10, 20 та 30 с. Температура повітря становила 20°C, швидкість фільтрації у шарі зерна 1 м/с. Початкова температура зерна становила 20°C.

При обробці даних визначають такі величини:

– спад вологи:  $\Delta m = m_0 - m_k$ , кг, (1)

– початковий і кінцевий вміст вологовміст :

$$u_0 = \frac{m_0}{m_{\text{сух}}}, \quad u_k = \frac{m_k}{m_{\text{сух}}}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

де  $m_{\text{сух}}$  – маса абсолютно сухого матеріалу,

– швидкість сушіння:

$$N = \frac{u_0 - u_k}{\tau_{\Sigma}}, \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}, \quad (3)$$

– загальну тривалість процесу сушіння:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MX} \cdot n_{MX} + \tau_k \cdot n_n, \text{ с} \quad (4)$$

– сумарні енерговитрати:

$$Q_{\Sigma} = P_{\text{м}} \cdot \tau_{\text{МХ}} \cdot n_{\text{МХ}} + P_{\text{вент}} \cdot \tau_{\text{к}} \cdot n_{\text{к}}, \text{ Дж} \quad (5)$$

У дослідах з продуванням нагрітим повітрям розрахунок проводиться за наведеною вище методикою, однак сумарні енерговитрати враховують також кількість теплоти, яка була витрачена на нагрівання повітря:

$$Q_{\Sigma} = P_{\text{м}} \cdot \tau_{\text{МХ}} \cdot n_{\text{МХ}} + P_{\text{вент}} \cdot \tau_{\text{к}} \cdot n_{\text{к}} + G_{\text{пов}} \cdot c_{\text{р.пов}} \cdot (t_{\text{пов}}^{\text{к}} - t_{\text{с}}) \cdot \tau_{\text{к}}, \text{ Дж} \quad (6)$$

– корисний тепловий потік, витрачений на випаровування вологи та нагрівання матеріалу:

$$Q_{\text{кор}} = \Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_{\text{к}}}{2} c_{\text{вол.м}} (t_{\text{к}} - t_0), \text{ Дж} \quad (7)$$

де  $c_{\text{вол.м}}$  – теплоємність вологого матеріалу, Дж/(кг·К)

– питомі енерговитрати:

$$q_{\text{пит}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta m}, \text{ Дж/кг.вол} \quad (8)$$

Оцінка характеристик сушіння проводилася до досягнення середнього кінцевого вмісту вологи.  $u_{\text{к}} = 0,144$  кг/кг.

Результати експериментальних досліджень сушіння зерна при МХ-конвективному циклічному підведенні енергії

#### Продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву

Метою досліджень було визначення впливу тривалості продування шару зерна ненагрітим повітрям на кінетику сушіння та енерговитрати, а також доцільність такого продування.

На рис. 2 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення теплоти та продування за циклами при  $\tau_{\text{конец}} = 10$  с (загальна тривалість процесу – 130 с, число циклів – 6,5, швидкість повітря 1 м/с).

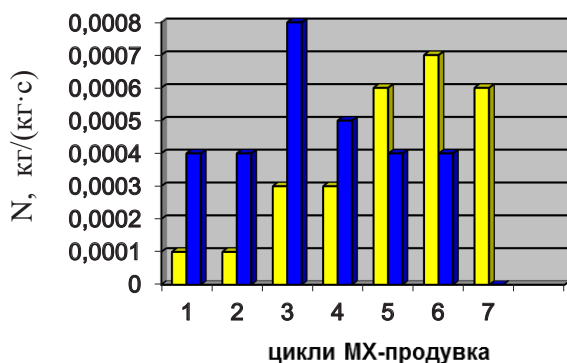


Рис. 2. Зміна швидкості сушіння  $N$  протягом досвіду під час продування повітрям без попереднього підігріву  $\tau_{\text{конец}} = 10$  с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 10 с

Питомі витрати енергії за весь дослід становили 9,07 МДж/кг, середня швидкість сушіння за весь період  $N = 4,3 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Середня швидкість МХ

сушіння  $N_{\text{МХ}} = 3,43 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість за періоди продування  $N_{\text{к}} = 4,83 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с).

На рис. 3 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення теплоти та продування за циклами при  $\tau_{\text{конец}} = 20$  с.

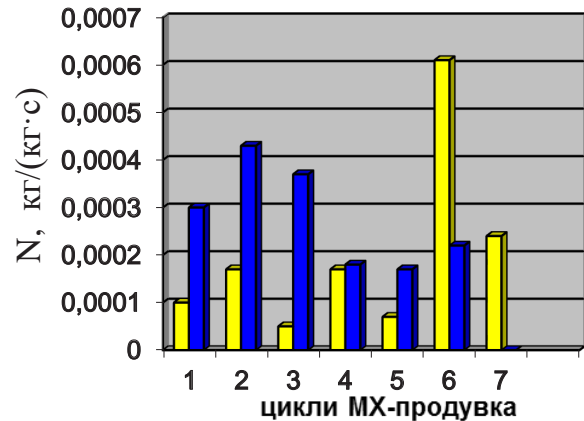


Рис. 3. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування повітрям без попереднього підігріву  $\tau_{\text{конец}} = 20$  с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 20 с

Під час продування ненагрітим повітрям  $\tau_{\text{к}} = 20$  с. (загальна тривалість процесу – 190 с, число циклів – 6,5) питомі витрати енергії за весь дослід склали 9,68 МДж/кг, швидкість сушіння  $N = 2,74 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Середня швидкість МХ сушіння  $N_{\text{МХ}} = 2,01 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_{\text{к}} = 2,78 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с).

На рис. 4 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення та продування за циклами при  $\tau_{\text{конец}} = 30$  с.

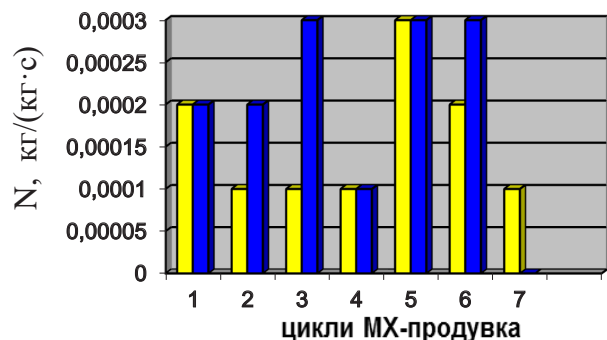


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування повітрям без попереднього підігріву  $\tau_{\text{конец}} = 30$  с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 30 с

Під час продування холодним повітрям при  $\tau_{\text{к}} = 30$  с. загальна тривалість дослід – 250 с, число циклів – 6,5. Питомі витрати енергії за весь дослід становили 8,96 МДж/кг, швидкість

сушіння  $N = 2,24 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Середня швидкість МХ сушіння  $N_{MX} = 1,57 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_k = 2,33 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с).

Швидкість сушіння в періоди продування ненагрітим повітрям зі збільшенням їхньої тривалості зменшується. Так, при співвідношенні 10 с МХ – 10 с продування середня швидкість сушіння становила  $4,1 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), при 10 с МХ – 20 с продування середня швидкість сушіння становила  $2,6 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), при 10 с МХ – 30 с продування середня швидкість сушіння становила  $2,0 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Це пояснюється помітним зниженням температури матеріалу під час продування не нагрітим повітрям.

Питомі енерговитрати під час продування зневажливо малі. При збільшенні  $\tau_k$  з 10 с до 30 с питомі енерговитрати практично не змінилися.

#### Продування шару зерна нагрітим повітрям

Результати отримані в умовах продування шару повітрям, нагрітим до температури повітря  $= 50^\circ\text{C}$ . Початкова температура зерна становила  $t_{\text{зерна}} = 20^\circ\text{C}$ , потужність магнетрону  $P_c = 600$  Вт. Тривалість періоду підведення мікрохвильової енергії завжди становила 10 с. Зерновий матеріал – овес.

При  $t_{\text{пов}} = 50^\circ\text{C}$  зерно було перегріте вище припустимого значення: при  $\tau_k = 10$  с кінцева температура складала  $95^\circ\text{C}$ , при  $\tau_k = 20$  с кінцева температура  $91^\circ\text{C}$ .

На рис. 5 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення та продування нагрітим повітрям по циклах при  $\tau_k = 10$  с.

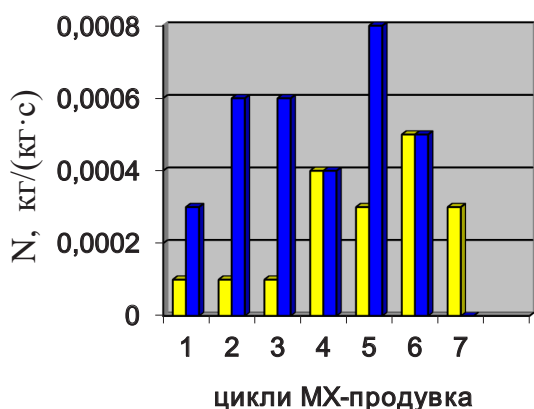


Рис. 5. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування нагрітим повітрям  $\tau_{\text{ковн}} = 10$  с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 10 с

При продуванні з періодом  $\tau_k = 10$  с (тривалість досвіду 130 с, кількість періодів 6,5, швидкість повітря 1 м/с, витрата 0,0118 кг/с) питомі витрати енергії за весь досвід склали 11,72 МДж/кг, середня швидкість сушіння  $3,8 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Середня швидкість МХ сушіння

$N_{MX} = 2,57 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_n = 5,33 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с).

На рис. 6 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення та продування нагрітим повітрям по циклах при  $\tau_k = 20$  с.

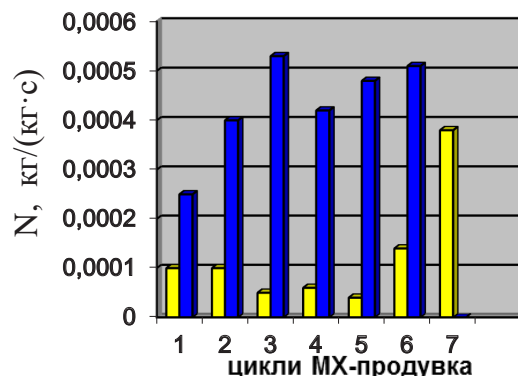


Рис. 6. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування нагрітим повітрям  $\tau_k = 20$  с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 20 с

При продуванні нагрітим повітрям з періодом  $\tau_k = 20$  с (тривалість досвіду 190 с, кількість періодів 6,5, швидкість повітря 1 м/с, витрата 0,0118 кг/с) питомі витрати енергії протягом усього досвіду становили 14,33 МДж/кг. Середня швидкість МХ сушіння  $N_{MX} = 1,24 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_k = 4,32 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Середня швидкість сушіння за дослід становила  $N = 3,8 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с).

Результат зіставлення даних за швидкістю сушіння при продуванні ненагрітим повітрям наступний: при тривалості МХ нагріву 10 с і тривалості продування 10 с середня швидкість МХ сушіння  $N_{MX} = 3,43 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_k = 4,83 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с); при тривалості МВ нагрівання 10 с та тривалості продування 20 с  $N_{MX} = 2,01 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_k = 2,78 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), при тривалості МХ нагрівання 10 с та тривалості продування 30 с  $N_{MX} = 1,57 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_k = 2,33 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). У всіх цих дослідах середня швидкість сушіння при продуванні вище, ніж при МХ нагріванні. При цьому збільшення тривалості продування призводить до зменшення швидкості сушіння як під час МХ підведення енергії, так і в період продування. Питомі витрати приблизно рівні. Таким чином, перший режим є кращим.

Аналіз даних по сушінню нагрітим повітрям: при тривалості МХ нагрівання 10 с та тривалості продування 10 с середня швидкість МХ сушіння  $N_{MX} = 2,57 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_k = 5,33 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с);

при тривалості МХ нагрівання 10 с та тривалості продування 20 с середня швидкість МХ сушіння  $N_{MX} = 1,24 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с), середня швидкість під час продування  $N_{\kappa} = 4,32 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Так як швидкість сушіння в першому випадку була вищою, а питомі витрати нижче, то цей режим є кращим.

**Висновки.** Питомі енерговитрати були мінімальними  $q_{\text{пит}} = 9,07$  МДж/кг у режимі продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву з періодом  $\tau_{\kappa} = 10$  с, при цьому швидкість сушіння становила  $N = 4,3 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Максимальні питомі енерговитрати  $q_{\text{пит}} = 14,33$  МДж/кг відповідали режиму продування нагрітим повітрям  $t_{\text{нов}} = 50$  °С при  $\tau_{\kappa} = 20$  с. Швидкість сушіння склала  $N = 2,94 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Швидкість сушіння

в періоди продування ненагрітим повітрям зі збільшенням їхньої тривалості зменшується. Це пояснюється помітним зниженням температури матеріалу під час продування повітрям.

Питомі енерговитрати були мінімальними  $q_{\text{пит}} = 9,07$  МДж/кг у режимі продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву з періодом  $\tau_{\kappa} = 10$  с, при цьому швидкість сушіння становила  $N = 4,3 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Максимальні питомі енерговитрати  $q_{\text{пит}} = 14,33$  МДж/кг відповідали режиму продування нагрітим повітрям  $t_{\text{нов}} = 50$  °С при  $\tau_{\kappa} = 20$  с. Швидкість сушіння склала  $N = 2,94 \cdot 10^{-4}$  кг/(кг·с). Швидкість сушіння в періоди продування ненагрітим повітрям зі збільшенням їхньої тривалості зменшується. Це пояснюється помітним зниженням температури матеріалу під час продування повітрям.

#### Список літератури:

1. Martin-Gatton College of Agriculture, Food and Environment URL: <http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/id/id125/10.pdf>.
2. Ziegler V., Paraginski RT, Ferreira CD. Concilium. 2023. Vol. 23, no. 8. P. 37–56. URL: <https://doi.org/10.53660/clm-1249-23e13>.
3. Kalender'yan VA, Boshkova IL, Volgusheva NV Kinetics of microwave dring of free-flowing organic material. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. Vol. 79, no. 3. P. 547–552. URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0133-y>
4. Волгушева Н. В., Угольников О. П. Кінетика мікрохвильового сушіння зерна у нерухомому кулі. Refrigeration Engineering та Technology. 2023. Т. 59, № 2. С. 128–135. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2633>.
5. Acierno D., Barba AA, d'Amore M. Heat transfer phenomena під час процесування матеріалів з microwave energy. Heat and Mass Transfer. 2003. Vol. 40, no. 5. P. 413–420. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-003-0482-4>.
6. Al-Ali M., Parthasarathy R. Modeling and kinetics study novel microwave irradiation dring of naproxen sodium drug. // Powder Technology. 2019. Vol. 345. P. 766–774.
7. Охорона повітря і мікрохвильова продукція кінетики білих кавалків (*Brassica oleraceae* L. var *capitata* L.): Modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics / BS Luka et al. // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. P. 100–605.
8. Heat and Mass Transfer на Microwave Drying of Rough Rice Grains: An Experimental Analysis / EG Silva et al. // Agriculture. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 8.

#### **Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Kapauz K.O. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF OAT GRAIN DRYING WITH MICROWAVE-CONVECTIVE HEATING**

*Cyclic modes of microwave-convective drying of a stationary layer of oat grains are studied. An analysis of publications on the topic of research on drying with the use of microwave field energy and its combination with convective drying was carried out. The perspective of drying with the use of microwave energy has been established, however, for the creation of appropriate technologies, there is a lack of information on the speed of drying and the validity of choosing a rational method of heat supply. The task of obtaining data on grain drying rates during cyclic microwave-convective heat supply and choosing a rational mode based on the values of specific (per kilogram of evaporated moisture) energy consumption is formulated. The scheme of the experimental installation is presented, which allows studying the influence of the duration of blowing and air temperature on the patterns of changes in temperature and moisture content of the material, drying speed and specific energy consumption. The method of conducting the experiment and the main dependencies for processing experimental data are presented. An analysis of the results of experiments during blowing the grain layer with air without preheating and heated to 50 °C was carried out. The duration of cycles of blowing the grain layer was 10, 20 and 30 s, the duration of microwave heating for all experiments was equal to 10 s. The value of the drying speed for the periods of microwave and convective energy input, as well as the average values of the drying speed for each experiment, were obtained. A comparative analysis of drying rates for periods of both microwave heating and convective heating at different durations of blowing cycles was carried out. The results of calculations of specific energy consumption under different cyclic drying conditions were obtained. The conditions for obtaining the minimum specific energy consumption (per kilogram of evaporated moisture) and the maximum drying speed have been determined.*

**Key words:** cyclic modes, dense layer, experimental setup, blowing duration, temperature, moisture content, drying speed, specific energy consumption.