

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3

Вібрації в техніці та технологіях



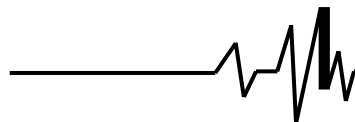
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 3 (114)

Вінниця 2024

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2024. – 3 (114) – 119 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 6 від 24.12.2024 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Згідно рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 25.04.2024 р. № 1337 науковому журналу «Вібрації в техніці та технологіях» присвоєно ідентифікатор медіа R30-05172.

*- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI);
- індексується в CrossRef, Google Scholar;
- індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus Value з 2018 року.*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Інститут механіки та
автоматики агропромислового виробництва
НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвеев В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. професор, Вінницький
національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

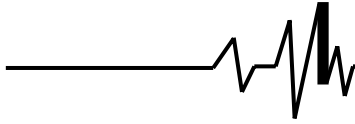
Зарубіжні члени редакційної колегії

Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/> Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М.***ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ В КОНВЕКТИВНО-ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ5***Головач І.В., Солона О.В., Мартиненко В.В.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ КОРЕНЕПЛОДУ БУРЯКА СТОЛОВОГО ПО СПІРАЛЯХ ВІБРАЦІЙНОГО ОЧИСНИКА.....13***Мельник В.М., Гнатейко Н.В., Бойко Г.В., Косова В.П.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО БАЗУВАННЯ20***Slipchenko M., Polievoda Y., Zamrii M., Symonik B.***STUDY OF GRAIN FLOW IN A CYLINDRICAL VIBRATING SIEVE.....27***Возняк О.М., Ярошенко Л.В., Луц П.М., Тихоненко С.В.***АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ АПК34****II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Михайлевич В.М., Колісник М.А., Штуць А.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ФЛАНЕЦЬ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ.....46***Shargorodskiy S., Halanskyi V.***DEVELOPMENT THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF STRIPED SOIL TREATMENT BY THE METHOD OF DISCRETE ELEMENTS.....58***Кондратюк Д.Г., Зозуляк І.А., Комаха В.П., Дмитренко В.П.***ВИТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ПЛЮЩЕННЯ ТРАВИ ВАЛЬЦЬОВИМ ПЛЮЩИЛЬНИМ АПАРАТОМ66***Паладійчук Ю.Б., Стецюк П.М.***ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КУТА НАХИЛУ ГРАБЛИНИ ВІДНОСНО ВОРУШІННЯ І ЗГРІБАННЯ СІНА РОТАЦІЙНИМИ ГРАБЛИНАМИ.....74****III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О.В., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Дідик А.М.***МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ ПРИ СУШІННІ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ83***Стаднік М.І., Бабин І.А., Луц П.М., Ріпа С.В.***АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ ДОЗУВАННЯ ТА ЗМІШУВАННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ.....90***Штуць А.А., Григоренко Н.В., Колісник М.А., Григоренко О.В.***АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ СПІРАЛЬНО-ГВИНТОВИМИ ТРАНСПОРТЕРАМИ.....97****IV. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Лаверенюк П.П.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ БУНКЕРНІЙ СУШАРЦІ.....111**



Лавренюк П. П.*
аспірант

Вінницький національний
аграрний університет

Lavreniuk P.
postgraduate student

Vinnitsia National Agrarian
University

УДК 664.694.047

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-13

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ БУНКЕРНІЙ СУШАРЦІ

Волоські горіхи є висококалорійним джерелом мікро- та макронутрієнтів, що робить їх цінним біоконцентратом для харчування. Однак для збереження їх якості в умовах зберігання та транспортування важливо враховувати ботанічний сорт та умови вирощування, оскільки вони впливають на стійкість до окислення. Для забезпечення тривалого зберігання та високої якості волоських горіхів необхідно вдосконалювати методи сушіння, що дозволяють знизити вологість до безпечного рівня, мінімізувати енергоспоживання та зменшити ризики псування та окислювального погіршення якості продукту. Метою дослідження є встановлення функціональних залежностей процесу сушіння волоських горіхів та обґрунтування оптимальних конструктивних, режимних і технологічних параметрів конвективної бункерної сушарки. Для перевірки теоретичних залежностей та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів сушарки виготовлено експериментальний зразок сушарки волоських горіхів СГК-4 «Тірас». Експериментальні дослідження проводилися на свіжозібраних волоських горіхах сорту Чандлер з початковою вологістю 22–28 %. Вивчено вплив таких факторів, як частота обертання шнеку, подача повітря та тривалість сушіння, на якість сушіння, енергоспоживання та продуктивність. Для досліджень використовували сучасні методи вимірювання вологості та енергетичних витрат, що дозволило визначити середню вологість горіхів, однорідність вологості, продуктивність сушарки та ефективність енергоспоживання. На основі проведених досліджень визначено функціональні залежності процесу сушіння волоських горіхів, а саме зміни середньої вологості горіхів w_μ (%), однорідності вологості горіхів у бункері Θ_w (%) і питомих витрат енергії на процес сушіння E_q (МДж/кг) від частоти обертання шнеку n (об/хв), подачі повітря Q (м³/год) і тривалості сушіння t (год). Ці залежності дозволяють обґрунтувати оптимальні параметри конвективної бункерної сушарки для забезпечення ефективного та рівномірного висушування: $n = 30,6$ об/хв, $Q = 1690,5$ м³/год, $t = 10,7$ год. При цих значеннях $w_\mu = 8$ %, $\Theta_w = 95$ % і $E_q = 0,558$ МДж/кг.

Ключові слова: волоські горіхи, сушіння, теплофізичні властивості, конвективна бункерна сушарка, енергоспоживання, вологість.

* Науковий керівник: к.т.н., доцент, декан інженерно-технологічного факультету Яропуд В.М.



Постановка проблеми. Волоські горіхи є висококалорійним джерелом мікро- та макронутрієнтів, що робить їх цінним біоконцентратом для харчування [1]. Однак для збереження їх якості в умовах зберігання та транспортування важливим є врахування ботанічного сорту та умов вирощування, оскільки вони впливають на стійкість до окислення [2].

Для забезпечення тривалого зберігання та високої якості волоських горіхів необхідно вдосконалювати методи сушіння, які дозволять знизити вологість до безпечного рівня, мінімізувати енергоспоживання та зменшити ризики псування та окислювального погіршення якості продукту [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теплофізичні властивості волоських горіхів мають важливе значення для процесу сушіння та збереження їхньої якості під час тривалого зберігання [4]. Вивчення таких параметрів, як питома теплоємність, теплопровідність та температуропровідність, є необхідним для оптимізації процесів сушіння та обробки горіхів [5]. Дослідження [6, 7] показали, що питома теплоємність, теплопровідність та температуропровідність ядер волоського горіха залежать від вмісту вологи та температури, що впливає на їхні теплові характеристики. Ці властивості збільшуються з підвищенням температури та вологості, що пояснюється тим, що вода має вищу теплопровідність і питому теплоємність, ніж тверді матеріали ядра. Результати досліджень [8] дозволяють точніше моделювати та контролювати процес сушіння, забезпечуючи таким чином ефективну обробку і тривале зберігання горіхів без втрати якості.

Процес сушіння пов'язаний із перенесенням тепла та вологи. У типовому процесі тепловий потік надходить всередину матеріалу, забезпечуючи переміщення вологи через капіляри й пори. Розрізняють два типи вологи: вільну та зв'язану, кожна з яких має свої особливості видалення в процесі сушіння. Незв'язана волога видалається легше, тоді як зв'язана волога потребує більше енергії для видалення, що може потребувати випаровування перед дифузією назовні [9].

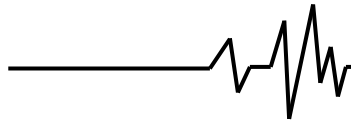
Сушіння харчових продуктів проходить три стадії: початкове прискорення швидкості висихання, етап постійної швидкості, коли видалається вільна волога, та період спаду швидкості, де відбувається видалення зв'язаної вологи. Кожен з цих етапів обмежений різними факторами, включаючи температуру та швидкість повітряного потоку [10, 11].

Існує безліч методів сушіння, таких як сушіння гарячим повітрям, радіочастотне та вакуумне сушіння, кожен з яких має свої переваги й недоліки та підходить для різних видів продукції [12]. Наприклад, сушіння гарячим повітрям є популярним через нескладність й низькі витрати, однак для продуктів, таких як волоські горіхи, ефективніше використовувати комбінації методів, як-от радіочастотне нагрівання з гарячим повітрям. Різні експерименти показали, що використання комбінованих методів суттєво скорочує час сушіння та поліпшує якість продукту [13, 14]. Для досягнення оптимальних результатів сушіння продуктів важливо враховувати фактори, такі як температура, вологість, швидкість повітря, глибина шару продукту тощо.

За результатами аналізу [15] існуючих сушильних установок, визначено їх недоліки та переваги, встановлено застосування конвективних бункерних сушарок у різних лініях виробництва серед промислових товарів, харчових продуктів, будівельних матеріалів, що потребують перемішування сипучого продукту. Застосування цих сушарок продемонструвало надійність в експлуатації при сушінні значних обсягів сировини, відсутність застійних зон, високу результативність процесу автоматизації всього технологічного процесу сушіння [16, 17, 18].

Мета і завдання досліджень. Встановлення функціональних залежностей процесу сушіння волоських горіхів та обґрунтування оптимальних конструктивних, режимних і технологічних параметрів конвективної бункерної сушарки.

Матеріали і методи досліджень. З метою перевірки отриманих теоретичних залежностей і обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів сушарки волоських горіхів виготовлено її експериментальний зразок SGK-4 «Тірас» в умовах ТОВ «Краснянське СП Агромаш» [19]. Загальний вигляд сушарки приведено на рис. 1 (а). Шнековий робочий орган приведено на рис. 1 (б). Приводом гвинтового робочого органу є мотор-редуктор ЗМП-31,5 (45 об/хв, 225 Н·м). Система підігріву і подачі повітря у бункер складається з повітряно-опалювального агрегату Термія АО ЕВО 24,0/1,3 ТП (3х400В)К УХЛ3.1 із заміненим вентилятором на ВР 287-46 і представлена на рис. 1 (в). Технічні характеристики сушарки волоських горіхів наведені в таблиці 1.



а



б



в

а – вигляд спереду; б – шнековий робочий орган;
в – система підігріву і подачі повітря у бункер

Рис. 1. Загальний вигляд сушарки волоських горіхів

Управління режимами роботи сушарки здійснюються відповідним блоком керування (рис. 2), до складу якого входить перший частотний перетворювач Veichi AC70-T3-1R5G/2R2P для двигуна система підігріву і

подачі повітря у бункер, другий частотний перетворювач CFW300 для двигуна гвинтового робочого органу, терморегулятори TC4S-24R і програмований таймер DH48S-2Z.



а



б



в

а – загальний вигляд панелі блока керування; б – частотний перетворювач Veichi AC70-T3-1R5G/2R2P; в – терморегулятори TC4S-24R

Рис. 2. Загальний вигляд блоку керування сушарки волоських горіхів



Таблиця 1 – Технічні характеристики експериментального зразка конвективної сушарки волоських горіхів

Характеристика	Значення
Максимальна місткість бункера, м ³ (т)	4,0 (0,7)
Максимальна температура потоку повітря, ° С	120
Продуктивність вентилятора, м ³ /год	750–2100
Номінальна потужність двигуна вентилятора, кВт	0,55
Номінальна потужність нагрівача, кВт	12,0
Номінальна потужність гвинтового робочого органу, кВт	0,55
Розміри гвинтового робочого органу, мм	
– крок	150
– зовнішній діаметр	280
– діаметр валу	90
– довжина валу	2450
Габаритні розміри, мм	
– довжина	1920
– ширина	1920
– висота	3000
Маса, кг	950

Експериментальні дослідження проведені в приватному підприємстві «ЯФК-ВІТОН». Об'єкту досліджень були свіжозібрані волоські горіхи сорту Чандлер (урожай 2024 року) із початковою вологістю 22–28 %.

Факторами досліджень обрано частоту обертання шнеку n , подачу повітря Q , тривалість сушіння t . Рівні варіювання факторами наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Рівні та інтервали варіювання факторами

Рівень	Частота обертання шнеку n , об/хв (x_5)	Подача повітря Q , м ³ /год (x_6)	Тривалість сушіння t , год (x_4)
-1	15	800	0
0	30	1400	7
+1	45	2000	14
Δ	15	600	7

Варіювання факторами в дослідженні відбувалось таким чином. Частота обертання шнеку x_5 і подача повітря x_6 варіювалися на трьох рівнях: -1; 0; +1. Тривалість сушіння x_4 варіювалось за рівнями: -1; -0,8; -0,6; -0,4; -0,2; 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1. Дослідження проведені за повнофакторним планом для трьох факторів із зазначеними рівнями із загальною кількістю дослідів за планом – 99, фактично – 9. Повторність трикратна.

Частоту обертання шнеку змінювали з використанням першого частотного перетворювача CFW300 і контролювалась з використанням безконтактного тахометра Venetech GM8905.

Подачу повітря регулювали з використанням другого частотного перетворювача Veichi AC70-T3-1R5G/2R2P з використанням багатофункціонального пристрою Solomat MPM 500E.

Тривалість сушіння фіксувалась з використанням програмованого таймера DN48S-2Z.

За критерії дослідження обрано: середня вологість горіхів w_μ (%); однорідність вологості горіхів у бункері Θ_w (%); продуктивність q (кг/год); витрати енергії на процес сушіння E (МДж); питомі витрати енергії на процес сушіння E_q (МДж/кг).

Для визначення середньої вологості горіхів w_μ провели відбір 10 проб з бункера у випадкових місцях з використанням відповідного щупа. Вологість кожної проби визначали з використанням відкаліброваного вологоміра He Lite. Далі отримані дані усереднювали w_μ і додатково розраховували середньоквадратичне відхилення w_σ .

Однорідність вологості горіхів у бункері Θ_w визначали за формулою

$$\Theta_w = 100 \left(1 - \frac{w_\sigma}{w_\mu} \right), \quad (1)$$

де w_μ – середня вологість горіхів, %; w_σ – середньоквадратичне відхилення вологості горіхів, %.



В бункер завантажували горіхи визначеної маси (420 кг), яка визначалась з використанням вагів ВТ-100-С1. Продуктивність q розраховували за формулою:

$$q = \frac{M_0}{t}, \quad (2)$$

де M_0 – маса горіхів, $M_0 = 420$ кг;
 t – тривалість сушіння, год.

Витрати енергії на процес сушіння E визначали з використання трифазного лічильника Sinotimer DTS6619 через який було підключено блок керування сушарки.

Питомі витрати енергії на процес сушіння E_q розраховували за формулою

$$E_q = \frac{E}{M_0}, \quad (3)$$

де E – витрати енергії на процес сушіння, МДж;
 M_0 – маса горіхів, $M_0 = 420$ кг.

За результатами досліджень необхідно визначити рівняння регресії критеріїв досліджень від факторів, побудувати відповідні поверхні відгуку і визначити раціональні параметри факторів за яких досягається умова:

$$\begin{cases} w_\mu < 8 \%, \\ \Theta_w < 95 \%, \\ E_q \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4)$$

Результати досліджень. За результатами експериментальних досліджень встановлена закономірність зміни середньої вологості горіхів w_μ (%) від факторів досліджень

в розкодованому вигляді без урахування не значущих коефіцієнтів регресії (рис. 3):

$$w_\mu = 33,898 - 0,0639947 n + 0,000613777 n^2 - 0,00226516 Q + 4,85747 \cdot 10^{-7} Q^2 - 3,88094 t + 0,169828 t^2. \quad (5)$$

З рівняння (5) видно, що w_μ нелінійно зменшується зі збільшенням кожного з параметрів, але існує ефект насичення, коли надмірне збільшення n , Q чи t перестає покращувати результати. Частота обертання шнеку визначає інтенсивність змішування, що сприяє рівномірному розподілу повітря в суміші. При низьких значеннях n вологість зменшується, оскільки краща циркуляція повітря дозволяє ефективніше видаляти вологу. Подача повітря Q впливає на швидкість видалення вологи: чим більше подається повітря, тим швидше волога може виходити з горіхів. Але при надмірно великій подачі з'являється ризик надлишкового нагрівання, що може зменшувати ефективність сушіння через нерівномірне пересушування. Тривалість сушіння t має значний вплив на кінцеву вологість: чим довше триває процес, тим більше часу на видалення вологи, але після певної межі подальше збільшення часу сушіння перестає бути ефективним і навіть може зумовлювати пересушування чи деградацію структури продукту. Розрахований критерій Фішера $F(5) = 2851,8 > F_t(0,05;92;198) = 1,33$ свідчить про адекватність отриманої математичної моделі.

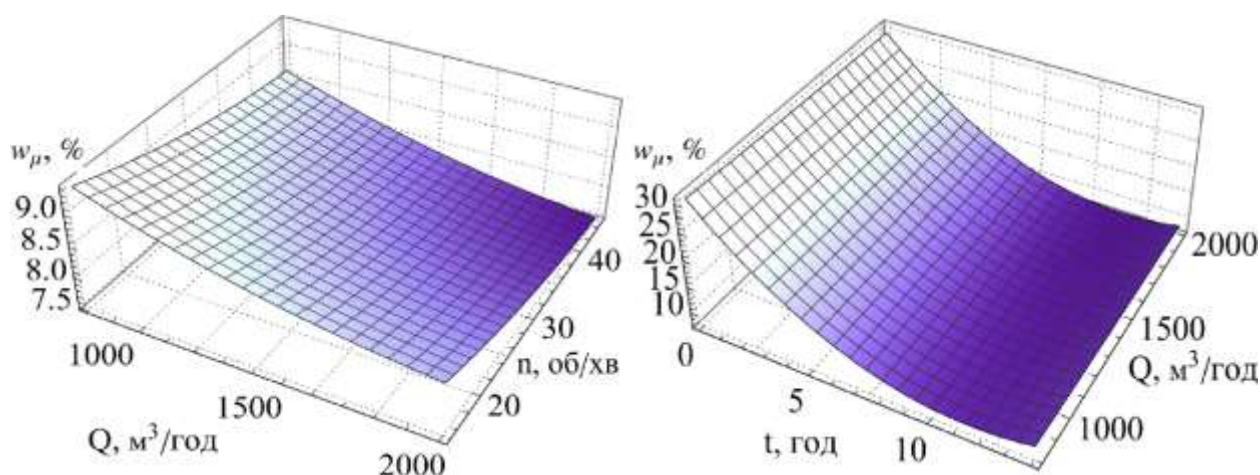


Рис. 3. Закономірність зміни середньої вологості горіхів w_μ (%) від частоти обертання шнеку n (об/хв), подачі повітря Q (м³/год) і тривалості сушіння t (год)

вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів регресії (рис. 4):

вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів регресії (рис. 4):

$$\Theta_w = 88,4063 - 0,38254 n + 0,0135997 Q + 0,000165177 n Q - 3,99285 \cdot 10^{-6} Q^2 - 0,719225 t + 0,0513732 t^2.$$



Частота обертання шнеку n та подача повітря Q разом з тривалістю сушіння t визначають ефективність розподілу повітря та теплоти, що прямо впливає на рівномірність висушування горіхів. Збільшення частоти обертання n покращує однорідність, оскільки більш інтенсивне змішування сприяє рівномірному доступу повітря до кожного горіха. Проте надмірно висока частота знижує однорідність, оскільки може спричинити нерівномірне висушування через надмірне механічне навантаження. Подача повітря Q позитивно впливає на однорідність на початкових рівнях, адже більший об'єм повітря сприяє рівномірному розподілу теплоти. Проте в рівнянні є члени, що враховують як взаємодію n і Q , так і квадратичний вплив Q , що свідчить про ефект насичення. Після певного рівня надлишковий потік повітря може знижувати однорідність через нерівномірне розподілу температури, а також спричинити

пересушування поверхневих шарів при недостатньому висушуванні внутрішніх. Тривалість сушіння t також впливає на рівномірність вологості. На початкових стадіях подовження часу сприяє більш однорідному висушуванню, але коли час стає занадто тривалим, починає домінувати зворотний ефект через перегрівання, що може призвести до нерівномірного видалення вологи. Таким чином, залежність Θ_w від параметрів $n = 15$ об/хв, $Q = 2000$ м³/год і $t = 14$ год. описує комплексний процес, де кожен параметр має оптимальні значення, при яких однорідність вологості максимальна $\Theta_w = 98,8$ %. Поза цими оптимальними значеннями ефективність однорідного висушування знижується, і це відображається в нелінійності рівняння. Розрахований критерій Фішера $F(6) = 75818,1 > F_{\alpha}(0,05;91;198) = 1,32$ свідчить про адекватність отриманої математичної моделі.

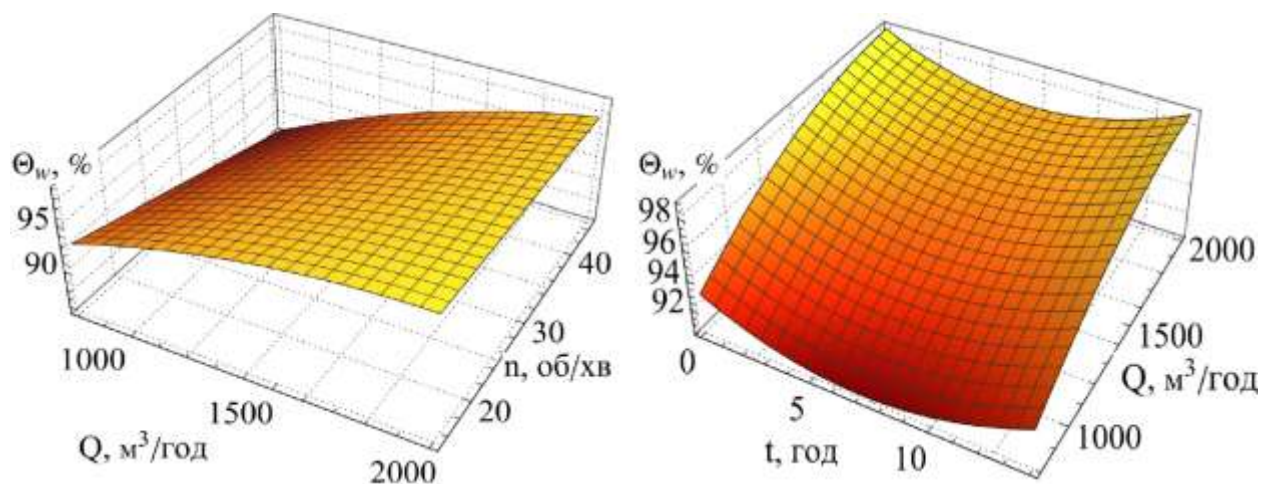


Рис. 4. Закономірність зміни однорідності вологості горіхів у бункері Θ_w (%) від частоти обертання шнеку n (об/хв), подачі повітря Q (м³/год) і тривалості сушіння t (год)

За результатами експериментальних досліджень встановлена закономірність зміни питомих витрат енергії на процес сушіння E_q (МДж/кг) від факторів досліджень в розкодованому вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів регресії (рис. 5):

$$E_q = 0,0059125 - 2,81893 \cdot 10^{-18} n - 9,625 \cdot 10^{-6} Q + 3,4375 \cdot 10^{-9} Q^2 + 0,00830094 t + 0,0000540257 n t + 0,0000251107 Q t. \quad (7)$$

Зменшення витрат енергії при низьких значеннях n пояснюється тим, що менша частота обертання вимагає менше механічної енергії для змішування, а отже, менше енергії витрачається на забезпечення необхідного руху повітря і горіхів. Зі збільшенням подачі повітря Q , питомі енергетичні витрати підвищуються,

оскільки більший об'єм повітря забезпечує ефективніше видалення вологи, тому що потрібно більше об'єму повітря, що потребує більше енергії для нагрівання та транспортування. Тривалість сушіння t відіграє важливу роль, оскільки з її зростанням питома енерговитратність зростає пропорційно, адже більший час сушіння означає додаткове споживання енергії. Це особливо виражено, коли t взаємодіє з n та Q : більша частота обертання чи більша подача повітря разом із тривалим часом сушіння призводять до суттєвого збільшення енергоспоживання через необхідність підтримання сталих умов процесу. Розрахований критерій Фішера $F(7) = 9794,1 > F_{\alpha}(0,05;92;198) = 1,33$ свідчить про адекватність отриманої математичної моделі.

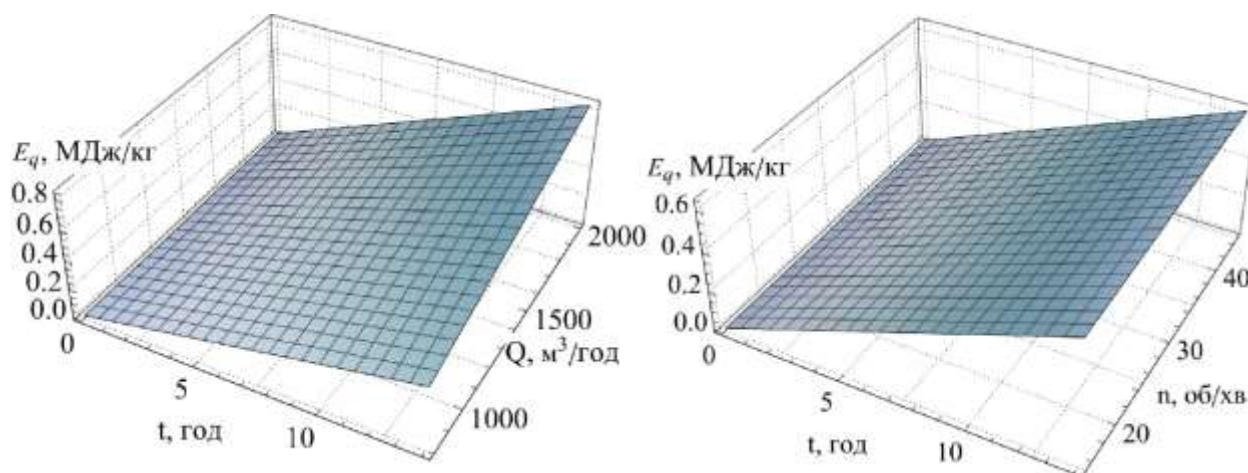
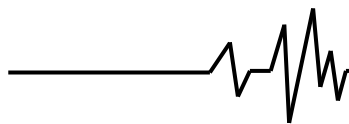


Рис. 5. Закономірність зміни питомих витрат енергії на процес сушіння E_q (МДж/кг) від частоти обертання шнеку n (об/хв), подачі повітря Q ($\text{м}^3/\text{год}$) і тривалості сушіння t (год)

В зв'язку з тим, що рівняння (5)–(7) мають різні оптимальні значення факторів скористаємося умовою (4). Спільне рішення системи рівнянь (4)–(7) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволяє визначити раціональні значення факторів: $n = 30,6$ об/хв, $Q = 1690,5$ $\text{м}^3/\text{год}$, $t = 10,7$ год. При цих значеннях середня вологість горіхів $w_\mu = 8$ %, однорідність вологості горіхів у бункері $\Theta_w = 95$ % і питомі витрати енергії на процес сушіння $E_q = 0,558$ МДж/кг.

Висновки. На основі проведених досліджень визначено функціональні залежності процесу сушіння волоських горіхів, а саме зміни середньої вологості горіхів w_μ (%), однорідності вологості горіхів у бункері Θ_w (%) і питомих витрат енергії на процес сушіння E_q (МДж/кг) від частоти обертання шнеку n (об/хв), подачі повітря Q ($\text{м}^3/\text{год}$) і тривалості сушіння t (год). Ці залежності дозволяють обґрунтувати оптимальні параметри конвективної бункерної сушарки для забезпечення ефективного та рівномірного висушування: $n = 30,6$ об/хв, $Q = 1690,5$ $\text{м}^3/\text{год}$, $t = 10,7$ год. При цих значеннях $w_\mu = 8$ %, $\Theta_w = 95$ % і $E_q = 0,558$ МДж/кг.

Список використаних джерел

1. Меженський В.М. Волоський горіх (*Juglans regia* L.). 2020. Київ: Видавництво Ліра-К. ISBN 978-617-520-015-5.
2. Поперечний А.М., Корнійчук В.Г. Цінність горіхової сировини та передумови до процесів її переробки. *Обладнання та технології харчових виробництв. Збірник наукових праць*. 2009. 20, 5 с.
3. Wongso I. Drying and quality characteristics of almonds and walnuts with different drying conditions (Master's thesis). 2021. University of California, Davis. 112 p.

4. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials. *Drying Technology*. 2007. 25 (8). P. 1203-1213. URL: <https://doi.org/10.1080/07373930701506660>.

5. Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. Zhang L. et al. *Journal of Food Science and Technology*. 2018. 55 (8). P. 3207-3214. URL: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3227-6>.

6. Gharibzahedi S.M.T., Ghahderijani M., Lajevardi Z.S. Specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of red lentil seed as a function of moisture content. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2014. 38 (6). P. 1807-1811. URL: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12151>

7. Mamani I. Modeling of thermal properties of Persian walnut kernel as a function of moisture content and temperature using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2015. 39 (12). P. 2762-2772. URL: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12527>.

8. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials. *Drying Technology*. 2007. 25 (7). P. 1203-1213. URL: <https://doi.org/10.1080/07373930701541757>

9. Mujumdar A.S. Handbook of industrial drying (4th ed.). 2014. CRC Press.

10. Zhang L., Wang Z., Shi G., Yang H., Wang X., Zhao H., Zhao S. Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. *Journal of Food Science and Technology*. 2018. 55 (5). P. 1733-1742. URL: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3227-6>

11. Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.). Wang W. et al. *LWT - Food Science and*



Technology. 2018. 90. P. 526-534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.002>

12. Sahnia E.K., Chaudhuri B. Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches. *International Journal of Pharmaceutics*. 2012. 434 (1–2). P. 334-348. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.06.010>

13. Stahl M., Granström M., Berghel J.R., Renström M. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*. 2004. 27 (6). P. 621-628. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.019>

14. Murugan P., Dhanushkodi S., Sudhakar K., Wilson V. H. Industrial and small-scale biomass dryers: An overview. *Energy Engineering*. 2021. 118 (3). P. 435-446. URL: <https://doi.org/10.32604/EE.2021.013491>

15. Dhanushkodi S., Wilson V.H., Sudhakar K. Design and performance evaluation of biomass dryer for cashewnut processing. *Advances in Applied Science Research*. 2015. 6 (8). P. 101-111.

16. Яропуд В.М., Лавренюк П.П. Шляхи удосконалення конструкції конвективної сушарки волоських горіхів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. 1 (120). С. 120-131. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-1-14>

17. Яропуд В.М., Шаргородський С.А., Луц П.М., Лавренюк П.П. Симуляція процесу сушіння волоських горіхів у конвективній сушарці. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. 3 (118). С. 101-109. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-13>

18. Kaletnik H., Yaropud V., Kupchuk I., Aliiev E., Babyn I., Lavreniuk P. Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. 99 (12). С. 91-97. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2023.12.17>

19. Калетнік Г.М., Яропуд В.М., Шаргородський С.А., Лавренюк П.П. Патент на корисну модель. Конвективна сушарка волоських горіхів. № 153978. Україна, МПК F26B 11/12 (2006.01); №u202300675; заяв. 20.02.2023; опубл. 27.09.2023, Бюл. № 39.

References

1. Mezhenskyi, V.M. (2020). Walnut (*Juglans regia* L.). Kyiv: Lyra-K Publishing House. ISBN 978-617-520-015-5 [in Ukrainian].

2. Poperechnyi, A.M., Kornichuk, V.H. (2009). The value of nut raw materials and prerequisites for their processing. *Equipment and technologies of food production. Collection of scientific papers*. 20, 5 p [in Ukrainian].

3. Wongso, I. (2021). Drying and quality characteristics of almonds and walnuts with

different drying conditions (Master's thesis). University of California, Davis. 112 p [in English].

4. Chen, X.D. (2007). Moisture diffusivity in food and biological materials. *Drying Technology*. 25 (8), P. 1203-1213 [in English].

5. Zhang, L., Wang, Z., Shi, G., Yang, H., Wang, X., Zhao, H., Zhao, S. (2018). Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. *Journal of Food Science and Technology*. 55 (8), P. 3207-3214 [in English].

6. Gharibzahedi, S.M.T., Ghahderijani, M., Lajevardi, Z.S. (2014). Specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of red lentil seed as a function of moisture content. *Journal of Food Processing and Preservation*. 38 (6), P. 1807-1811 [in English].

7. Mamani, I. (2015). Modeling of thermal properties of Persian walnut kernel as a function of moisture content and temperature using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39 (12), P. 2762-2772 [in English].

8. Chen, X.D. (2007). Moisture diffusivity in food and biological materials. *Drying Technology*. 25 (7), P. 1203-1213.

9. Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of industrial drying (4th ed.). CRC Press [in English].

10. Zhang, L., Wang, Z., Shi, G., Yang, H., Wang, X., Zhao, H., Zhao, S. (2018). Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. *Journal of Food Science and Technology*. 55 (5), P. 1733-1742 [in English].

11. Wang, W., Jung, J., McGorin, R. J., Traber, M. G., Leonard, G. C., Zhao, Y. (2018). Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.). *LWT-Food Science and Technology*. 90, P. 526-534 [in English].

12. Sahnia, E. K., Chaudhuri, B. (2012). Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches. *International Journal of Pharmaceutics*. 434 (1–2), P. 334-348 [in English].

13. Stahl, M., Granström, M., Berghel, J. R., Renström, M. (2004). Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*. 27 (6), P. 621-628 [in English].

14. Murugan, P., Dhanushkodi, S., Sudhakar, K., Wilson, V. H. (2021). Industrial and small-scale biomass dryers: An overview. *Energy Engineering*. 118 (3), P. 435-446 [in English].

15. Dhanushkodi, S., Wilson, V. H., Sudhakar, K. (2015). Design and performance evaluation of biomass dryer for cashewnut processing. *Advances in Applied Science Research*. 6 (8), P. 101-111 [in English].



16. Yaropud, V.M., Lavreniuk, P.P. (2023). Ways to improve the design of a convective walnut dryer. *Technology, energy, agriculture transport AIC*. 1 (120), P. 120-131 [in Ukrainian].

17. Yaropud, V.M., Sharhorodskiy, S.A., Luts, P.M., Lavreniuk, P.P. (2022). Simulation of the walnut drying process in a convective dryer. *Technology, energy, agriculture transport AIC*. 3 (118), P. 101-109 [in Ukrainian].

18. Kaletnik, H., Yaropud, V., Kupchuk, I., Aliiev, E., Babyn, I., Lavreniuk, P. (2023). Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 99 (12), P. 91-97 [in English].

19. Kaletnik H.M., Yaropud V.M., Sharhorodskiy S.A., Lavreniuk P.P. (2023). Patent for utility model. Convective dryer for walnuts. № 153978. Ukraine [in Ukrainian].

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DRYING PROCESS OF WALNUTS IN A CONVECTIVE BUNKER DRYER

Walnuts are a high-calorie source of micro- and macronutrients, which makes them a valuable bio-concentrate for nutrition. However, to preserve their quality during storage and transportation, it is important to consider the botanical variety and growing conditions, as they affect resistance to oxidation. To ensure long-term storage and high quality of walnuts, it is necessary to improve drying methods that allow to reduce humidity to a safe level, minimize energy consumption and reduce the risks of spoilage and oxidative deterioration of product quality. The purpose of the study is to establish the functional

dependencies of the process of drying walnuts and justify the optimal design, operating and technological parameters of the convective bunker dryer. An experimental sample of the CGK-4 «Tiras» walnut dryer was made to check the theoretical dependencies and justify the design and technological parameters of the dryer. Experimental studies were conducted on freshly picked walnuts of the Chandler variety with an initial moisture content of 22–28%. The effect of such factors as screw rotation frequency, air supply and drying duration on drying quality, energy consumption and productivity was studied. Modern methods of measuring humidity and energy consumption were used for the research, which made it possible to determine the average moisture of nuts, homogeneity of moisture, productivity of the dryer and efficiency of energy consumption. On the basis of the conducted studies, the functional dependence of the process of drying walnuts was determined, namely changes in the average moisture content of nuts w_{μ} (%), homogeneity of moisture content of nuts in the hopper Θ_w (%) and specific energy consumption for the drying process E_q (MJ/kg) on the screw rotation frequency n (rpm), air supply Q (m^3/h) and drying time t (h). These dependencies make it possible to justify the optimal parameters of the convective hopper dryer to ensure efficient and uniform drying: $n = 30.6$ rpm, $Q = 1690.5$ m^3/h , $t = 10.7$ h. With these values $w_{\mu} = 8\%$, $\Theta_w = 95\%$ and $E_q = 0.558$ MJ/kg.

Key words: walnuts, drying, thermophysical properties, convective bunker dryer, energy consumption, humidity.

Відомості про автора

Лавренюк Петро Петрович - аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: lavreniuk.petro.1239@gmail.com). ORCID 0000-0002-2480-7365.

Lavreniuk Petro - postgraduate student of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: lavreniuk.petro.1239@gmail.com). ORCID 0000-0002-2480-7365.