

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4

# Вібрації в техніці та технологіях



**Всеукраїнський науково-технічний журнал**

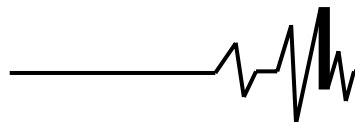
**Ukrainian Scientific & Technical Journal**

# **Вібрації в техніці та технологіях**

**№ 4 (115)**

**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. – 4 (115) – 87 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

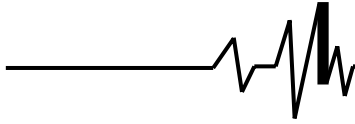
**Зарубіжні члени редакційної колегії**

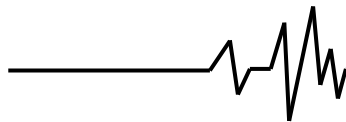
**Максімов Джордан Тодоров** – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

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](mailto:vibration.vin@ukr.net)

**З М І С Т****I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Цуркан О.В., Спірін А.В., Гудзенко Н.М., Дідик А.М.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ В КОНВЕКТИВНО-ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ.....5***Стаднік М.І., Бурлака С.А., Луц П.М.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВОДНОГО ТА ПОЖИВНОГО БАЛАНСУ В ЗАМКНУТИХ ГІДРОПОНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....15***Барановський В.М., Борецька Т.Ю., Козут В.М.***ІНТЕРАКТИВНИЙ ВПЛИВ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ДОДАТКОВОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ КОРЕНЕВОЇ ЗОНИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ГІДРОПОННОГО САЛАТУ.....24***Kondratuk D., Trukhanska O., Priadkin M.***RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CUT GRASS DURING HAY HARVESTING BY ROTARY WORKING BODIES.....31****II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Вакуленко Р.А.***РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПОВЕДІНКИ НЕЖОРСТКИХ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ МІЖТРУБНИХ ПЕРЕМИЧОК ТРУБНОЇ ДОШКИ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....36***Штуць А.А., Бабін І.А., Луц П.М., Руткевич В.С.***МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ВИСАДЖУВАННЯ ЗОВНІШНІХ БУРТІВ НА ТРУБНИХ ЗАГОТОВКАХ ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....44****III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О.В., Спірін А.В., Дідик А.М., Бондаренко М.П.***ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ.....52***Зозуляк І.А., Кондратюк Д.Г., Коробко Д.О.***ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СУБЛІМАЦІЙНОГО СВЧ-СУШІННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ.....60***Novhorodska N.***INFLUENCE OF ULTRASOUND VIBRATIONS ON THE FERMENTATION PROCESS OF FERMENTED MILK DRINKS.....70***Бровко Р.С., Пугач А.М., Калина В.С.***ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЖИМУ ОЛІЄВМІСНОЇ СИРОВИНИ НА ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ.....77****IV. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Lysenko R.***SIMULATION OF TRACTOR ENGINE OPERATION IN GAS-DIESEL MODE.....84**

**Цуркан О.В.**

д.т.н., професор

**Спирін А.В.**

к.т.н., доцент

**Відокремлений  
структурний підрозділ  
«Ладжинський фаховий  
коледж ВНАУ»**

**Дідик А.М.**

Аспірант

**Бондаренко М.П.**

Магістр

**Вінницький національний  
аграрний університет**

**Tsurkan O.**Doctor of Technical Sciences,  
Professor**Spirin A.**Ph.D. of Engineering, Associate  
Professor

**Separated structural unit  
«Ladyzhyn Professional  
College of Vinnytsia  
National Agrarian**

**Didyk A.**

postgraduate student

**Bondarenko M.**

Student

**Vinnytsia National Agrarian  
University**

**УДК: 631.365:6335****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7**

## **ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ**

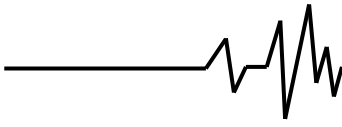
Сушіння є найбільш важливим процесом в технологіях переробки рослинної продукції, в тому числі і волоських горіхів. Сушарки з конвективним підведенням тепла є найбільш розповсюдженими в сільському господарстві завдяки найвищій енергетичній ефективності, відносній простоті конструкції та надійності в роботі. Сучасні серійні конвективні сушарки витрачають енергії в 5-7 разів більше ніж «ідеальна» сушарка. Інтенсифікація процесу сушіння може бути здійснена двома основними способами – збільшенням різниці температур між сушильним агентом і матеріалом та покращенням умов теплообміну між ними. При сушінні волоських горіхів найбільш прийнятним є шлях збільшення коефіцієнту теплообміну між теплоносієм та горіхами. Для виконання цієї мети автори пропонують застосувати вібраційну дію на шар горіхів. Різномірна направленість вібраційної дії дозволяє зменшити аеродинамічний опір шару, збільшити площу контакту матеріалу і сушильного агенту, турбулізувати прикордонний шар між ними. Для реалізації представлених положень було запропоновано принципово нову конструктивно-технологічну схему конвективно-вібраційної сушарки. Використані інноваційні підходи у її функціонуванні дозволили підвищити якісні показники волоських горіхів в процесі зберігання та переробки. Застосування комплексного конвективно-вібраційного способу сушіння волоських горіхів дозволило знизити величину енергії на випаровування 1 кг вологи до 3,9 МДж в порівнянні з 5-6 МДж для сучасних серійних сушарок. Результати виробничої перевірки підтвердили правильність запропонованих підходів. Подальші дослідження в інтенсифікації роботи конвективно-вібраційної сушарки мають бути направлені на визначення раціональних параметрів вібраційного впливу, вибору компромісного рішення між затратами на реалізацію вібраційних коливань шару волоських горіхів та енергією, яка витрачається на їх створення.

**Ключові слова:** сушильний агент, температура, швидкість, коефіцієнт теплообміну, випаровування, волога.

**Постановка проблеми.** Сушіння є основним процесом в технологіях переробки більшості продуктів рослинництва сільськогосподарського виробництва. Саме від успішного її проведення залежить якість готової продукції та її собівартість, адже на долю саме процесу сушіння припадає лівова частка всіх енергозатрат технології переробки. Особливо яскраво це проявляється при переробці волоських горіхів. Адже на переробку із саду горіхи поступають вологістю 35-50% , а згідно

ДСТУ 8900:2019 для подальшої переробки або зберігання їх вологість повинна становити 10% [1]. Наразі більшість сушарок, які працюють в сільському господарстві, витрачають 5000-6000 кДж енергії на випаровування 1 кг вологи з рослинних матеріалів [2,3]. Звичайно, це показники «реальних» сушарок, і вони в 5-7 разів більше ніж дані показники для «ідеальної» сушарки.

Очевидно що до показників «ідеальної» сушарки обладнання яке використовується в



сучасному агропромислового комплексу України на даному етапі розвитку техніки і технологій не досягне, але зменшити затрати енергії на процес сушіння, тобто інтенсифікувати його – завдання цілком реальне.

Саме шляхам інтенсифікації процесу сушіння волоських горіхів при їх післязбиральній переробці і присвячена дана робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливості сільськогосподарського виробництва, зокрема післязбиральної переробки продукції рослинництва, вплинули і на особливості застосування сушильного обладнання та його конструктивні рішення. Найбільшого розповсюдження в аграрному виробництві набули сушарки конвективної дії. Класифікація цього виду обладнання, опис конструкцій основних конвективних сушарок сільськогосподарського призначення і особливості їх роботи наведені в [4]. Їхнє широке застосування обумовлено декількома причинами. В переважній більшості випадків в якості теплоносія використовується атмосферне повітря, яке можна відносно просто нагріти і передавати енергію продукту сушіння. Рухомий потік нагрітого повітря є також середовищем яке сприймає вологу що випаровується із продукту. Але, звичайно разом з перевагами існують і недоліки в роботі конвективних сушарок. Як це часто буває в житті, недоліки є продовженням переваг. Великі об'єми продукту сушіння потребують і значних об'ємів повітря що перекачується в сушильних установках. Відпрацьований сушильний агент в більшості випадків має досить значну температуру що призводить до значних втрат енергії. Ці та інші проблеми зумовлюють пошук нових шляхів для інтенсифікації процесу сушіння в конвективних сушарках.

Для інтенсифікації процесу сушіння використовують багато різноманітних заходів та засобів. Розглянемо деякі з них, які були висвітлені у вітчизняних та закордонних джерелах.

Одним з таких способів є застосування кондуктивно-конвективного способу сушіння [5]. При цьому матеріал додатково нагрівається шляхом кондуктивного підводу тепла до боксів в яких він знаходиться. Це зменшує експозицію процесу, але потребує додаткових джерел теплової енергії. Окрім цього, такий спосіб навряд чи можна застосовувати для термолабільних матеріалів через більшу інерцію регулювання температури при кондуктивному підводі тепла.

Застосування повітряно-озонової суміші для сушіння рослинних матеріалів може бути досить перспективним напрямком інтенсифікації процесу [6,7]. Адже застосування озону не тільки збільшує швидкість вологовіддачі, але й позитивно впливає на мікрофлору поверхні

частинок матеріалу. Це особливо важливо при переробці продукції яка закладається на довгострокове зберігання.

При переробці бобових культур (соя, кормові боби) на корм застосовують механічну систему підготовки бобів [8,9]. Часткове попереднє руйнування оболонки бобів дозволяє зменшити експозицію процесу сушіння майже в 1,5 рази, що дозволяє значно скоротити затрати енергії. Але цей метод потребує виготовлення та використання додаткового обладнання, і він може бути застосований лише при заготівлі кормів.

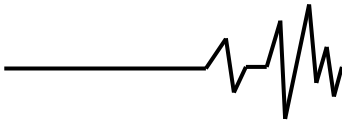
Попередній нагрів зерна в допоміжному пристрої та використання теплового насоса описані в роботах [10,11]. Ці та деякі інші малопоширені пристрої також можуть бути використані для інтенсифікації процесу сушіння в окремих випадках і не можуть бути рекомендованими для широкого застосування.

До такої ж категорії засобів можна віднести методи представлені в роботах [12, 13]. Звичайно, сушіння зерна при тиску нижче атмосферного і використання всмоктуючого повітряного потоку дозволяють зменшити експозицію сушіння, але реалізація таких методів потребує значних переобладнань конструкцій сушарок що не завжди можна здійснити в умовах реального господарства.

Останнім часом набуло поширення використання вібраційного впливу для інтенсифікації процесу сушіння. Застосування вібраційного впливу дозволяє нерухомий шар матеріалу привести до квазікиплячого стану що значно зменшує аеродинамічний опір та експозицію процесу [14, 15, 16]. Ще однією позитивною рисою вібраційного впливу є те, що його можна застосовувати в конвективних сушарках різного типу.

Одна з найповніших класифікацій способів та засобів інтенсифікації процесу сушіння наведена в [17]. Зокрема, серед заходів з інтенсифікації процесу сушіння там присутні наступні: вібрація, акустична дія, електричні та магнітні поля, зниження вологовмісту теплоносія, перемішування зерна, зниження тиску теплоносія, зміна швидкості теплоносія, зменшення товщини шару зерна, зміна швидкості руху зерна. Звичайно, в одній сушильній системі неможливо реалізувати зразу всі або більшість з названих заходів. Але частину з них можна застосувати виходячи з конкретних умов виробництва.

Розглянуті вище джерела були присвячені питанням інтенсифікації процесу сушіння зернових матеріалів. Саме питання сушіння зерна займають чільне місце в наукових роботах присвячених сушінню сільськогосподарської продукції. Да і вся еволюція сушарок сільськогосподарського призначення розглядається саме з точки зору



сушіння зерна. Питання сушіння горіхів наразі виглядають значно скромніше. Але і тут є наукові праці присвячені питанням інтенсифікації процесу сушіння горіхів.

В роботі [18] досліджували процес сушіння волоських горіхів гарячим повітрям. Відмічається що ефективна дифузія вологи для шкаралупи і ядра залежить від температури сушильного агенту, і дієвим способом інтенсифікації процесу сушіння є збільшення температури повітря.

В роботі [19] досліджували вплив температури та швидкості сушильного агенту на перебіг процесу сушіння. Результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок що обидва ці параметри суттєво впливають на інтенсивність процесу сушіння. Але в роботі не приведено раціональне співвідношення цих головних параметрів процесу сушіння. А саме ці параметри визначають енергозатрати всього процесу.

В роботі [20] досліджували вплив структури волоського горіха на характеристики процесу перенесення вологи під час процесу замочування і сушіння. Відмічається, що навіть незначний час замочування (до 5 хвилин) значно подовжує подальший процес висихання горіхів. Значний вплив на процеси перенесення вологи мають стан шкаралупи та перетинок горіха. Можна зробити висновок для практичної реалізації технології переробки волоських горіхів, що після їх миття перед подачею в основну сушарку потрібно проводити операцію попереднього зняття поверхневої вологи.

Аналіз джерел присвячених питанню інтенсифікації процесу сушіння рослинних матеріалів показує що в кожному конкретному випадку дане питання вирішувалось з урахуванням цілого ряду факторів. До уваги брались конкретні умови і потреби господарства, вид і обсяг продукції яку потрібно висушити, наявність сушарки відповідної конструкції, потужність джерел енергії тощо. В усіх розглянутих джерелах недостатньо уваги приділено теоретичному обґрунтуванню підвищення інтенсивності процесу сушіння рослинної продукції, зокрема волоських горіхів. Саме питанню теоретичного дослідження шляхів підвищення інтенсивності процесу сушіння, а також практичній реалізації цього процесу присвячена дана робота.

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів шляхом теоретичного обґрунтування можливих заходів для інтенсифікації та розробки відповідних засобів для реалізації енергоефективного процесу сушіння.

**Результати досліджень.** відносно матеріалу) середовищі. Ці процеси тісно пов'язані між собою і впливають один на одного.

Внутрішні процеси відбуваються завдяки порушенню рівноваги вологи в об'ємі часток. Коли волога випаровується з поверхневих шарів, втрачається тепло, центральні шари залишаються більш вологими, що викликає внутрішній тепло- і масообмін.

Зовнішні процеси включають випаровування вологи з поверхні матеріалу в середовище сушильного агента, а також теплообмін між матеріалом і сушильним агентом.

При випаровуванні вологи з поверхні матеріалу виникає градієнт вологовмісту між поверхневими та внутрішніми шарами. На переміщення вологи всередині матеріалу вирішальний вплив робить термодифузія, дія якої обумовлена перепадом температури всередині матеріалу. Під дією термовологопровідності волога переміщується по напрямку потоку тепла від місць з більш високою температурою до місць з нижчою температурою. У середині вологого матеріалу волога буде переміщуватись під дією градієнтів вологовмісту і температури.

Весь процес сушіння можна розділити на два періоди. При досягненні на поверхні матеріалу температури вологого термометра, волога починає випаровуватись з поверхні. При сталому режимі роботи, коли випаровується волога, яка слабо зв'язана з сухою речовиною матеріалу, вона встигає переміститись з внутрішніх шарів матеріалу до поверхні. Волога переміщується до поверхні в рідкій фазі, температура матеріалу встановлюється майже однаковою по всьому об'єму, а швидкість сушіння постійна. Цей перший період сушіння так і називається – період постійної швидкості сушіння, або першим періодом сушки.

По мірі зниження вологовмісту зв'язок вологи з матеріалом збільшується, а потік вологи з внутрішніх шарів матеріалу зменшується. Швидкість випаровування вологи з поверхні матеріалу залишається без змін і виникає дефіцит вологи на поверхні матеріалу. Ці явища характеризують другий період сушіння. У цьому періоді відбувається поглиблення зони випаровування. З глибини матеріалу до поверхні випаровування волога передається в рідкому стані, а після неї до поверхні вона рухається у вигляді пари. При цьому збільшується температура поверхні матеріалу, тому що охолоджуюча дія випаровування зменшується. У другому періоді швидкість сушіння зменшується. При досягненні вологості матеріалу рівноважної, яка відповідає даним параметрам, процес сушіння зупиняється.

При сушінні термолабільних матеріалів, до яких відноситься і ядро волоського горіху, необхідно збільшити процес переносу вологи у



вигляді рідини і зменшити перенесення її у вигляді пари.

Інтенсивність вологовіддачі з поверхні матеріалу до сушильного агента визначається рівнянням [21]:

$$i = \frac{\alpha}{r}(t - \vartheta) \quad (1)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/м<sup>2</sup>град;

$r$  – прихована теплота випаровування води, кДж/кг;

$t$  – температура сушильного агента, °С;

$\vartheta$  – температура поверхні матеріалу, °С.

У процесі сушіння між вологою, яка поступає з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні, і вологою, що випаровується з поверхні матеріалу, повинна існувати рівновага, тобто повинна виконуватись умова:

$$a_m \rho_o (\nabla U + \delta \nabla \vartheta) = \frac{\alpha}{r}(t - \vartheta) \quad (2)$$

де:  $a_m$  – коефіцієнт дифузії води, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_o$  – густина абсолютно сухої частини матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\nabla U$  – градієнт вологовмісту, кг/кг;

$\nabla \vartheta$  – градієнт температури, °С.

Аналіз рівняння (2) дозволяє визначити два основних напрямки підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів в конвективній сушарці. Перший шлях – збільшення різниці температур матеріалу і сушильного агента, а в нашому випадку це просто збільшення температури сушильного агента. Але температуру сушильного агента можна підвищувати лише до певної межі. Адже волоський горіх є термолабільним матеріалом, тобто його споживчі якості залежать від температури нагріву ядра горіха. Волоські горіхи багаті на олії, які при високих температурах стають прогірклими і негативно впливають на смак. Тому для горіхів раціональною є температура ядра близько 20°С, і ні в якому разі вона не може перевищувати 28°С [22,24]. Звичайно, це рекомендації для температури ядра горіха, температура шкаралупи і самого теплоносія може бути більшою.

Отже, найбільш дієвим способом підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів видається збільшення коефіцієнта теплообміну між теплоносієм і матеріалом. Існує також декілька шляхів підвищення цього коефіцієнта. На перший погляд саме просте рішення – це збільшення швидкості сушильного агента. Адже коефіцієнт теплообміну залежить від критерія Рейнольдса, а той, в свою чергу – від швидкості сушильного агента. Але збільшення швидкості сушильного агента потребує додаткових витрат енергії на привід вентиляційної установки, окрім цього збільшення

швидкості сушильного агента підвищує аеродинамічний опір шару матеріалу.

Існує ще одна проблема щодо збільшення величини коефіцієнта теплообміну притаманна саме волоським горіхам. Через свої морфологічні особливості (значний розмір і масу в порівнянні з зерновими і бобовими культурами та практично правильну форму кулі) при укладанні волоських горіхів в нерухомий шар частина поверхні горіхів не контактує з теплоносієм. Це явище назване «дзеркальним шаром» було досліджено ще в середині минулого сторіччя радянськими науковцями (Птіцин С.Д., Аеров М.Е.). Проведені авторами попередні дослідження показують що як мінімум 30% площі горіхів не обдуваються сушильним агентом.

Ці недоліки можна усунути якщо застосувати вібраційний вплив на шар горіхів. Під дією вібрації шар горіхів із нерухомого перетворюється в квазікиплячий. При цьому зменшується аеродинамічний опір шару, збільшується площа контакту горіха і теплоносія що, відповідно, збільшує коефіцієнт теплообміну. Також відбувається турбулізація прикордонного шару на межі «матеріал-теплоносій» за рахунок нерівномірності обтікання сушильним агентом віброуючих горіхів. Звичайно ж турбулізація сушильного агента також сприяє збільшенню коефіцієнта теплообміну.

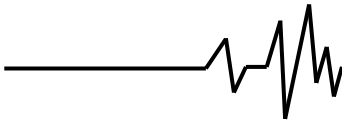
Всі ці міркування були враховані при виборі технології сушіння волоських горіхів та обладнання для її реалізації. Детальний опис конструкції та принцип роботи конвективно-вібраційної сушарки наведено в [23,24]. В даній роботі ми наведемо загальний вигляд сушарки та результати практичної реалізації процесу сушіння волоських горіхів.



Рис. 1. Загальний вигляд конвективно-вібраційної сушарки

Для перевірки роботоздатності обладнання були проведені виробничі випробування. Горіхи початковою вологістю 28% в кількості 950 кг були завантажені в сушильну камеру і продувались теплоносієм  $t = 38^\circ\text{C}$  на протязі 7,5 годин. За цей час горіхи





досягнули кінцевої вологості 10%. Початкова кількість вологи в горіхах ставила 266 кілограм, а кінцева 76 кілограм. Таким чином за 7,5 годин сушіння було випаровано 190 кілограмів вологи. Кількість енергії застраченої на випарування цієї вологи становила:  $27,5 \text{ кВт} \times 7,5 \text{ год.} = 206,25 \text{ кВт год.} = 742,5 \text{ МДж}$ . На випарування одного кілограма вологи було затрачено  $\frac{742,5}{190} = 3,91 \text{ МДж/кг}$ . Як було вказано в [2] сучасні сушарки витрачають на випарування 1 кілограма вологи 5,35 – 5,5 МДж/кг. Очевидно, що за даним показником, який найбільш повно характеризує енергетичну ефективність сушильного обладнання, сушарка марки KB-4-01 майже в 1,5 рази перевищує існуюче сушильне обладнання. Під час проведення виробничих випробувань частина горіхів надходила з перекарпієм на шкаралупі. Під дією вібраційного впливу рештки перекарпію, частинки листя та інші рослинні рештки були відсепаровані. Таким чином вібраційний вплив не тільки покращує енергетичні показники процесу сушіння, а й підвищує якість готової продукції. Подальші дослідження в інтенсифікації роботи конвективно-вібраційної сушарки мають бути направлені на визначення раціональних параметрів вібраційного впливу, вибору компромісного рішення між затратами на реалізацію вібраційних коливань шару волоських горіхів та енергією, яка витрачається на їх створення.

#### Висновки:

1. Проведений аналіз літературних джерел і досліджень дозволяє стверджувати що найкращим видом сушильного обладнання для переробки волоських горіхів є конвективні сушарки. Однією з головних переваг даного типу сушарок є можливість їх модернізації для інтенсифікації технологічного процесу

2. Для конвективних сушарок є два головних напрямки інтенсифікації процесу сушіння – збільшення температури сушильного агента та збільшення величини коефіцієнта теплообміну. Через термолабільність волоських горіхів перший шлях не є прийнятним і всі зусилля по інтенсифікації процесу направлені на покращення умов теплообміну.

3. Найбільш прийнятним способом збільшення коефіцієнту теплообміну є застосування вібраційної дії на шар матеріалу. Вібраційна дія перетворює нерухомий шар волоських горіхів в квазікиплячий. Це дозволяє зменшити аеродинамічний опір шару матеріалу та турбулізувати прикордонний шар на межі «матеріал-теплоносій».

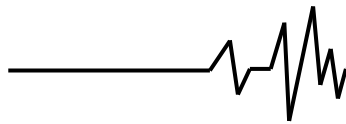
4. Застосування вібраційної дії дозволяє зменшити площу так званого «дзеркального шару», відповідно збільшити площу теплообміну між матеріалом і сушильним

агентом, що також сприяє інтенсифікації процесу сушіння.

5. Проведені виробничі випробування конвективно-вібраційної сушарки підтвердили її вищу (майже в 1,5 рази) енергоефективність ніж у сучасних серійних конвективних сушарок сільськогосподарського призначення, а також високу якість готового продукту.

#### Список використаних джерел

1. ДСТУ 8900:2019 Горіхи волоські. Технічні умови [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/dos> (дата звернення 26.10.2024)
2. Економічне сушіння. Журнал «The Ukrainian Farmer» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agrotimes.ua/article/ekonomne-sushinnya/> (дата звернення 22.10.2024)
3. Алейников В.І., Бейко С.Б. Підвищення енергетичного к.к.д. у зерносушарі АІ-ДСП-50. *Наукові праці ОДАХТ*. Вип. 21. С.22-24.
4. Солоня О.В., Замрій М.А. Дослідження процесу сушіння насінників трав. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022, №3 (106). С.78-87.
5. Пазюк В.М., Дуб В.В., Седих К.В. Фактори підвищення інтенсивності та енергоефективності сушіння зернових культур. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2023. №5, С.123-130.
6. Борисюк Д.В., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Твердохліб І.В. Дослідження процесу віброозонового сушіння зерна та енергетичних параметрів установки для його реалізації. *Наукові праці ВНТУ*. 2023. №2. С.56-71.
7. Rucins A., Viesturs D., Kristins A., Bruveris J. Investigations in intensification of grain drying by active ventilation applying ozone. *Engineering for rural development. Jelgava*. 2020. P. 231-237.
8. Цизь К.Є., Кірчук Р.В. Дослідження процесу та пошук шляхів інтенсифікації сушіння насіння сої. *Конструювання, експлуатація та виробництво с/г машин*. 2012. Вип.42. Ч.2. С.75-78.
9. Кірчук Р.В., Забродська Л.Ю., Копець К.Є. Вплив масообмінних факторів на кінетику сушіння зерен бобових культур. *Сільськогосподарські машини*. 2021, №46.
10. Трофименко А.В., Трофименко В.В. Аналіз факторів, що впливають на ефективність роботи сонячної сушарки. Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXII міжнар. Наук.-практ. конф. Київ: Інститут



відновлювальної енергетики НАНУ. 2021.С.574-580.

11. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Пазюк В.М. Інтенсифікація процесу сушіння насіннєвого зерна. *Пром. Теплотехніка*. 2010. Т. 32. №5. С.42-47.

12. Швидя В.О., Анеляк М.М., Степаненко С.П. Експериментальне дослідження режимів сушіння насіння зернових культур із високою вологістю в середовищі низького тиску. *Ж. Мех. та ел. с/г*. 2018. Вип.8. С.89-96.

13. Швидя В.О., Анеляк М.М., Степаненко С.П. Використання всмоктуючого повітряного потоку. *Ж. Мех. та ел. с/г*. 2017. Вип.6. С.81-86.

14. Бандура В., Фіалковська Л., Пахомська О. Технологія сушіння зернових культур та олійного насіння. *Наук. Вісник Таврійського держ. Агротехнологічного університету*. 2022. Том 12. №2.

15. Bahrom N., Nazokathon J., Farhodbek H. Intensification Of The Drying Process With Vibration Method. *The American Journal of Agriculture and Boimedical Engineering*. 2021. P. 24-31

16. Пазюк О. Д. Паламарчук І. П. Вібраційні зерносушарки як спосіб інтенсифікації та підвищення економічності процесу сушіння зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 4 (60). С.115–122.

17. Котов Б. І. Калініченко Р. А., Спірін А. В. Моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в безперервних сушарках колонкового типу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 6. С. 69–75.

18. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W., Khir R., Upadhyaya S., Pan Z. Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 150 (1). P. 119283

19. Chen C., Pan Z. Processing of Tree Nuts. *Postharvest Technology - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen, 2022. P. 1-25

20. Shuo W., Rui P., Zhong X., Fengping H., Jianxin F., Shuquan H. Design on key parameters of macadamia nut peeling device. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*. 2021. Vol. 42 (9). P. 107-113.

21. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Степаненко С.П., Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження): Монографія. Ніжин: ПП Лисенко М.М. 2017. 552 с.

22. Як правильно сушити горіхи [Електронний ресурс].- Режим доступу: <http://fakty.ua/408294> (дата звернення 16.10.2024)

23. Цуркан, О.В., Спірін, А.В., Руткевич, В.С., Дідик, А.М. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів. *Вісник Хмельницького національного університету Серія: Технічні науки*. 2024. 333(2). С. 393-399.

24. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Спірін А.В., Дідик А.М. Технологія переробки волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2 (113). С. 5-13.

### References

1. DSTU 8900:2019 Hair nuts. Technical conditions [Electronic resource]. – Access mode: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (access date 10/26/2024) [in Ukrainian]

2. Cost-effective drying. *Journal «The Ukrainian Farmer»* [Electronic resource]. – Access mode: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (access date 10/22/2024) [in Ukrainian]

3. Aleinikov V.I., Beiko S.B. Increase of energy efficiency in the grain dryer AI-DSP-50. *Scientific works of OSADHT*. Vyp. 21, pp. 22-24. [in Ukrainian]

4. Solona O., Zamriy M. Study of the process of drying grass seeds. (2022). *Vibrations in engineering and technology*. №3 (106). P.78-87. [in Ukrainian]

5. Paziuk V., Dub V., Sedykh K. (2023). Factors of increasing the intensity and energy efficiency of drying grain crops. *Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*. № 5, P.123-130. [in Ukrainian]

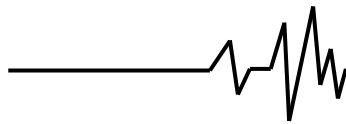
6. Borysiuk D., Spirin A., Prysiazhniuk D., Tverdokhlib I. (2023). Study of the process of vibro-ozone drying of grain and energy parameters of the installation for its implementation. *Scientific works of VNTU*. №2. P.56-71. [in Ukrainian]

7. Rucins A., Viesturs D., Kristins A., Bruveris J. (2020). Investigations in intensification of grain drying by active ventilation applying ozone. *Engineering for rural development. Jelgava*. P. 231-237. [in English]

8. Tsyz K.E., Kirchuk R.V. (2012). Process research and search for ways to intensify the drying of soybean seeds. *Design, operation and production of agricultural machinery*. Issue 42. Part 2, pp. 75-78. [in Ukrainian]

9. Kirchuk R.V., Zabrodska L.Yu., Kopets K.E. (2021). Influence of mass transfer factors on the kinetics of drying of legume grains. *Agricultural machinery*. №46. [in Ukrainian]

10. Trofimenko A.V., Trofymenko V.V. (2021). Analysis of factors influencing the efficiency of the solar dryer. *Renewable Energy*



and Energy Efficiency in the XXI Century: Proceedings of the XXII International. Scientific and Practical Conf. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. P.574-580. [in Ukrainian]

11. Snezhkin Yu., Shapar R., Chalaev D., Shavrin V., Paziuk V. (2010). Intensification of the process of drying seed grains. *Prom. Heat engineering*. T. 32. №5. P.42-47. [in Ukrainian]

12. Shvydia V., Anelyak M., Stepanenko S. (2018). Experimental study of drying grains with high humidity in a low-pressure environment. *J. Mech. and e-mail. s/g*. Issue 8, pp. 89-96. [in Ukrainian]

13. Shvydia V., Anelyak M., Stepanenko S. (2017). Use of suction air flow. *J. Mech. and e-mail. s/g*. Issue 6, pp. 81-86. [in Ukrainian]

14. Bandura, V., Fialkovska, L., Pakhomska, O. (2022). Tekhnologiya dryushennia zernykh crops ta oliynoho seeds. *Sciences Bulletin of the Tavria State. University of Agrotechnology*. Volume 12. №2. [in Ukrainian]

15. Bahrom N., Nazokathon J., Farhodbek H. (2021). Intensification Of The Drying Process With Vibration Method. *The American Journal of Agriculture and Boimedical Engineering*. P. 24-31. [in English]

16. Paziuk, O., Palamarchuk, I. (2010). Vibrating grain dryers as a way to intensify and improve the efficiency of the grain drying process. *Vibrations in engineering and technology*. № 4 (60). P. 115–122. [in Ukrainian]

17. Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A. (2016). Modeling of drying modes of dispersed materials in continuous column-type dryers. *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes*. № 6. Pp. 69–75. [in Ukrainian]

18. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W., Khir R., Upadhyaya S., Pan Z. (2020). Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 150 (1). P. 119283 [in English]

19. Chen C., Pan Z. (2022). Processing of Tree Nuts. *Postharvest Technology - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen. P. 1-25 [in English]

20. Shuo W., Rui P., Zhong X., Fengping H., Jianxin F., Shuquan H. (2021). Design on key parameters of macadamia nut peeling device. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*. Vol. 42 (9). P. 107-113. [in English]

21. Kotov B., Kalinichenko R., Stepanenko S., Shvydia V., Lisetskyi V. (2017). Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation,

cooling): Monograph. Nizhyn: PP Lysenko M. P. 552. [in Ukrainian]

22. How to dry nuts [Electronic resource]. – Access mode: <http://fakty.ua/408294> (access date 10/16/2024) [in Ukrainian]

23. Tsurkan, O., Spirin, A., Rutkevych, V., Didyk A. (2024). Development of a convective-vibrating dryer for drying walnuts. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University Series: Technical Sciences*. No. 2 (333). P. 393-399. [in Ukrainian]

24. Kaletnik G., Tsurkan O., Spirin A., Didyk A. (2024). Technology of walnut processing. *Vibrations in engineering and technology*. № 2 (113). P. 5-13. [in Ukrainian]

#### WAYS TO INCREASE THE INTENSITY OF THE WALNUT DRYING PROCESS

*Drying is the most important process in the processing of plant products, including walnuts. Convective heat dryers are the most common in agriculture due to their high energy efficiency, relative simplicity of design and reliability in operation. Modern serial convective dryers consume 5-7 times more energy than an "ideal" dryer. Intensification of the drying process can be carried out in two main ways – by increasing the temperature difference between the drying agent and the material and improving the heat exchange conditions between them. When drying walnuts, the most acceptable way is to increase the heat exchange coefficient between the coolant and the nuts. To accomplish this goal, the authors suggest applying a vibrational effect to a layer of nuts. The versatile direction of the vibration action makes it possible to reduce the aerodynamic resistance of the layer, increase the contact area of the material and the drying agent, and turbulize the boundary layer between them. To implement the presented provisions, a fundamentally new structural and technological scheme of a convective-vibration dryer was proposed. The innovative approaches used in its functioning made it possible to improve the quality indicators of walnuts in the process of storage and processing. The use of a complex convective-vibration method of drying walnuts made it possible to reduce the value of energy for the evaporation of 1 kg of moisture to 3.9 MJ compared to 5-6 MJ for modern serial dryers. The results of the production inspection confirmed the correctness of the proposed approaches. Further research in the intensification of the convective-vibration dryer should be aimed at determining the rational parameters of the vibration effect, choosing a compromise solution between the costs of implementing vibrational vibrations of the walnut layer and the energy spent on their creation.*

**Key words:** drying agent, temperature, velocity, heat transfer coefficient, evaporation, moisture.

**Відомості про авторів**

**Цуркан Олег Васильович** – доктор технічних наук, професор кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету, директор Відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» (вул. П. Кравчика, 5, м. Ладизин, Вінницька обл., 24321, Україна, e-mail: [tsurkan\\_ov76@ukr.net](mailto:tsurkan_ov76@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-7218-0026>).

**Спірін Анатолій Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент викладач відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету», e-mail: [spirinanatoly16@gmail.com](mailto:spirinanatoly16@gmail.com).

**Дідик Андрій Михайлович** – аспірант кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380972830537, [anddidyk99@gmail.com](mailto:anddidyk99@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>).

**Бондаренко Микола Павлович** – здобувач другого (освітньо-наукового рівня) вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Агроінженерія», інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380689609520, [bondarenko29012901@gmail.com](mailto:bondarenko29012901@gmail.com))

**Tsurkan Oleh** – D.Eng.Sc., professor of the Department of technological processes and equipment of processing and food industries of Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University, director of Separated structural unit «Ladyzhyn Professional College of Vinnytsia National Agrarian University» (5, P. Kravchyka St., Ladyzhyn, Vinnytsia region, 24321

**Spirin Anatoly** - candidate of technical sciences, associate professor, teacher of Separate structural subdivision «Ladyzhyn vocational college of Vinnytsia National Agrarian University» (Kravchik Petro St., 5, Ladyzhyn, Vinnytsia Region, Ukraine, 24321, e-mail: [spirinanatoly16@gmail.com](mailto:spirinanatoly16@gmail.com)).

**Didyk Andrii** – postgraduate student of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agro-Industrial Complex of the Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sunny Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380972830537, [anddidyk99@gmail.com](mailto:anddidyk99@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>)

**Bondarenko Mykola** – Applicant of the second (educational and scientific level) of higher education under the educational and scientific program "Agricultural Engineering", Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna Str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380689609520, [bondarenko29012901@gmail.com](mailto:bondarenko29012901@gmail.com))