**Цуркан О.В.**

д.т.н., професор

Спирін А.В.

к.т.н., доцент

Дідик А.М.

Аспірант

*Відокремлений
структурний підрозділ
«Ладизинський фаховий
коледж ВНАУ»*

Руткевич В.С.

к.т.н., доцент

*Вінницький національний
аграрний університет*

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

postgraduate student

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

Rutkevych V.Ph.D. of Engineering, Associate
Professor

*Vinnytsia National Agrarian
University*

УДК: 631.867:66.047.37**DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-2**

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛООБМІНУ ВІД РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ В КОНВЕКТИВНО-ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ

Розглянуто вплив основних режимних параметрів конвективно-вібраційної сушарки на коефіцієнт тепловіддачі з метою інтенсифікації тепломасообміну та підвищення енергоефективності процесу сушіння волоських горіхів. Встановлено, що домінуючими факторами, які визначають інтенсивність тепломасообміну, є швидкість та температура сушильного агента, геометрична структура шару матеріалу, а також параметри вібраційного впливу, зокрема амплітуда і частота коливань. Використання вібраційного впливу дозволяє створити псевдозріджений стан шару горіхів, зменшити аеродинамічний опір, підвищити турбулізацію повітряного потоку та збільшити коефіцієнт теплообміну до 1,5 разів порівняно з традиційним конвективним сушінням.

Розроблена методика визначення коефіцієнта теплообміну та питомих витрат енергії з урахуванням змінних температур, вологості та параметрів вібраційного впливу дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність процесу та формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації режимних параметрів.

Зазначено перспективи подальших досліджень, які включають вивчення впливу різних режимів вібрації на турбулізацію повітряного потоку, формування локальних вихорів у шарі матеріалу, розробку математичних моделей процесу з урахуванням взаємодії окремих елементів та змінної геометрії горіхів, масштабування результатів на промислові установки та розробку рекомендацій для оптимізації процесу сушіння з підвищенням продуктивності та збереженням якості продукції.

Ключові слова: вібраційно-конвективне сушіння, волоський горіх, тепломасообмін, коефіцієнт теплообміну, інтенсифікація сушіння, тепловіддача, сушильний агент, вібраційний вплив, режимні параметри, енергоефективність, денатурація білків і ліпідів, якість продукції.

Постановка проблеми. Інтенсифікація процесів сушіння рослинної сировини, зокрема волоських горіхів, є важливим завданням сучасної харчової та переробної промисловості [1]. Якість кінцевого продукту суттєво залежить від параметрів тепломасообміну, що визначають швидкість видалення вологи та характер термічної дії на ядро горіха. Підвищення температури сушильного агента є традиційним способом прискорення сушіння, однак перевищення

допустимого температурного рівня призводить до деградації ліпідної фракції, денатурації білків та погіршення органолептичних властивостей продукту [2-4]. Тому пошук альтернативних шляхів інтенсифікації сушіння без збільшення температури теплоносія є актуальною науковою проблемою.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності тепломасообміну є застосування вібраційного впливу на шар



матеріалу [4-7]. Вібрація здатна змінювати просторове положення окремих елементів у шарі волоських горіхів, зменшувати аеродинамічний опір та формувати квазікиплячий стан, у якому значно покращуються умови контакту між сушильним агентом і поверхнею матеріалу [8, 9]. Результати попередніх досліджень показують, що вібраційна дія забезпечує зростання коефіцієнта теплообміну, зменшує тривалість сушіння та сприяє підвищенню енергоефективності технологічного процесу. Водночас питання кількісного оцінювання впливу параметрів вібраційного режиму на інтенсивність тепломасообміну залишаються недостатньо вивченими.

Особливу складність становить вплив неоднорідної форми волоських горіхів на їх взаємне розташування в шарі та на характер взаємодії з потоком сушильного агента [10]. Від зміни геометричної структури шару залежить конфігурація пристінного шару повітря, турбулізація потоку, а отже - і ефективність передачі тепла. Наявні дослідження підтверджують тенденцію підвищення коефіцієнта теплообміну із зростанням швидкості сушильного агента, однак відсутні достатньо обґрунтовані експериментальні дані щодо комплексного впливу швидкості повітря та параметрів вібрації.

Таким чином, існує наукова необхідність у розробленні та експериментальному обґрунтуванні методів визначення коефіцієнта теплообміну при вібраційно-конвективному сушінні волоських горіхів, а також у встановленні закономірностей зміни ефективності сушіння залежно від режимних параметрів процесу. Отримані результати можуть стати основою для створення нових енергозберігаючих технологій сушіння, підвищення якості горіхової продукції та зменшення технологічних витрат у промислових умовах.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає у науковому обґрунтуванні впливу основних режимних параметрів на коефіцієнт тепловіддачі в конвективно-вібраційній сушарці з метою інтенсифікації процесу тепломасообміну та підвищення енергоефективності сушіння.

Задачі дослідження передбачають встановлення домінуючих факторів, що визначають закономірності формування коефіцієнта теплообміну, проведення експериментальних і аналітичних досліджень для оцінювання їхнього впливу, а також формулювання науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації параметрів функціонування сушильної системи.

Матеріали і результати дослідження. Матеріали дослідження включали конвективно-вібраційні сушарку лабораторного та напівпромислового виконання, обладнану

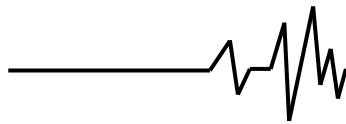
системою регулювання температури, швидкості подачі сушильного агента та параметрів вібраційного впливу [11–13]. Як об'єкти експериментальних досліджень використовувалися зразки волоських горіхів із різним початковим вмістом вологи, що мають характерні для аграрної сировини геометричні, термofізичні та аеродинамічні властивості. Додатково застосовувався комплекс вимірювальних засобів для контролю температурних полів, вологості матеріалу, швидкості повітряного потоку, а також амплітудно-частотних параметрів вібраційного впливу.

У практиці сушіння рослинної сировини, зокрема волоських горіхів, одним із визначальних завдань є забезпечення інтенсифікації процесу за збереження якості продукції. В межах дослідження проаналізовано основні методи підвищення ефективності сушіння, серед яких найбільш дієвими визнано [6, 13] збільшення температурного градієнта між теплоносієм і матеріалом та підвищення коефіцієнта теплообміну, що може бути реалізоване різними технологічними способами. Для волоських горіхів найбільш доцільним є застосування вібраційного впливу на шар матеріалу, оскільки реалізація першого підходу — підвищення температури теплоносія понад допустимі межі — призводить до істотного погіршення якості кінцевого продукту. Зокрема, тривале підвищення температури ядра горіха понад 38 °C спричиняє денатурацію ліпідної складової та зниження споживчих властивостей продукції [2, 3].

Коефіцієнт теплообміну зумовлюється сукупністю фізичних властивостей матеріалу та теплоносія, аеродинамічними параметрами повітряного потоку, характером їхньої взаємодії, а також режимами вібраційного впливу. За даними попередніх досліджень встановлено, що зі збільшенням швидкості руху сушильного агента та підвищенням його температури спостерігається зростання коефіцієнта теплообміну, причому температурний режим має обмежуватися допустимими для матеріалу значеннями.

Додатковим суттєвим чинником, що визначає інтенсивність процесів тепломасообміну, є просторове упорядкування елементів у шарі матеріалу. Волоські горіхи мають складну геометричну форму, яка зумовлює особливості їх взаємного розташування та характер контакту з повітряним потоком [2, 3, 13]. Зміна параметрів вібраційного впливу призводить до перебудови структури шару, що супроводжується зниженням аеродинамічного опору та зростанням ефективності тепломасообміну [5].

У роботах [5, 14] проаналізовано теоретичні основи теплообміну під час сушіння горіхів у конвективно-вібраційних сушарках. Запропоновано математичну залежність для визначення питомого теплового потоку з одиниці



поверхні матеріалу, яка може бути використана у подальших аналітичних та експериментальних дослідженнях, а також для оцінювання впливу режимних параметрів на ефективність процесу сушіння.

$$q = \frac{r}{100} \rho_0 R_H \frac{dw}{dt}, \quad (1)$$

де r – теплота випаровування, Дж/кг;

ρ_0 – щільність абсолютно сухого матеріалу, кг/м³;

R_H – відношення об'єму матеріалу до його поверхні м³/м²;

$\frac{dw}{dt}$ – швидкість сушіння, %/с.

Формула закону Ньютона для першого періоду сушіння в нашому випадку буде виглядати наступним чином:

$$q = \alpha(t - t_H), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепломасообміну, Вт/м²·°C;

t – температура сушильного агента, °C;

t_H – температура матеріалу, °C.

Після підстановки формули (2) в формулу (1) та деяких математичних перетворень, отримаємо вираз для масового коефіцієнта теплообміну:

$$\alpha_H = \frac{r(W_1 - W_2)}{100t \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

де α_H – коефіцієнт теплообміну на 1 кг матеріалу, Вт/кг °C;

W_1 та W_2 – відповідно початкова та кінцева вологість матеріалу, %

Δt – середня логарифмічна різниця температури сушильного агента і матеріалу, °C;

В роботі [5] дана залежність між теплою випаровування вологи і температурою, при якій відбувається цей процес:

$$r = 2493 - 2,3t, \quad (4)$$

де t – температура при якій відбувається випаровування вологи, °C.

Під час сушіння випаровування вологи відбувається за умов змінного температурного режиму, оскільки температура сушильного агента досягає максимального значення на вході в сушильну камеру та поступово зменшується до мінімального на її виході. У зв'язку з цим як визначальну величину у формулі (4) доцільно приймати середню температуру процесу сушіння [2, 14].

$$t = \frac{t_1 - t_2}{\ln(t_1/t_2)}, \quad (5)$$

де t_1 і t_2 – температура сушильного агента, відповідно на вході та виході із сушильної камери, °C

Середня логарифмічна різниця температур у формулі (3) визначається, як:

$$\Delta t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}, \quad (6)$$

де Δ_1 та Δ_2 – різниця температур сушильного агента та матеріалу, відповідно, на початку та в кінці процесу сушіння.

Наведені теоретичні положення та результати досліджень слугують підґрунтям для обґрунтування методики експериментального визначення коефіцієнта теплообміну. Реалізація цієї методики потребує встановлення основних параметрів процесу сушіння, зокрема початкових і кінцевих температур теплоносія та матеріалу, початкової і кінцевої вологості матеріалу, тривалості процесу, а також параметрів вібраційного впливу — частоти й амплітуди коливань сушильної камери.

Для оцінювання ефективності застосування вібраційного впливу доцільно виконати серію експериментів за умов нерухомого шару горіхів і за наявності вібрації при незмінних інших режимних параметрах сушіння. В обох випадках кінцева вологість волоських горіхів має відповідати агротехнічним вимогам і становити 10 % [10]. Для кожного режиму необхідно зафіксувати тривалість сушіння, яка, як очікується, буде меншою за умов вібраційного впливу. Зміна експозиції процесу зумовлює відповідні відмінності в енергетичних витратах на його реалізацію. Отримані експериментальні дані використовуються для подальшого розрахунку коефіцієнта теплообміну, а також питомих витрат енергії на одиницю продукції та на одиницю випарованої вологи.

Для дослідження процесу сушіння волоських горіхів була виготовлена лабораторна установка [12, 13].

Вологовміст волоських горіхів у процесі сушіння визначали за допомогою вологоміра ВСП-100 (Україна) (рис. 1). Температуру сушильного агента та шару горіхів вимірювали з використанням термопар типу Voltcraft PL-120 t1 (рис. 2), а також напівпровідникових інтегральних датчиків температури DS18B20. У дослідженнях застосовувалися волоські горіхи сорту «Chandler» у стані повної стиглості. Початкові значення температури горіхів за вологості $W=28\%$ були прийняті з урахуванням результатів попередніх власних експериментальних досліджень.



Рис.1. Загальний вигляд вологоміра ВСП-100

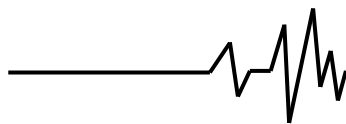


Рис.2. Загальний вигляд Voltcraft PL- 120 t1

Дослідження кінетики вібраційно-конвективного сушіння волоських горіхів здійснювали за сталого коефіцієнта заповнення робочої камери $K_z=75\%$ при варіюванні таких параметрів процесу: швидкості та температури сушильного агента, а також амплітуди і частоти коливань робочої камери.

Для визначення коефіцієнта теплообміну фіксували початкову та кінцеву вологість матеріалу [13], його температуру в різних зонах сушильного тракту, а також температуру теплоносія на вході та виході з вібраційної установки.

Коефіцієнт теплообміну є одним із ключових показників, що характеризує інтенсивність передавання теплової енергії від сушильного агента до матеріалу. У кількісному вираженні він відображає кількість теплоти, яку сприймає одиниця маси матеріалу за одиницю часу за умови різниці температур між матеріалом і сушильним агентом, що дорівнює 1°C .

Визначення зміни різниці температур між сушильним агентом і матеріалом здійснювалося відповідно до прийнятої методики. У процесі сушіння різниця температур між теплоносієм і матеріалом є змінною в часі та характеризується такою залежністю:

$$\Delta t = (t_0 - \vartheta_0) \exp(-k_2 \tau) \quad (7)$$

Постає завдання у визначенні числового значення коефіцієнта K_2 .

Для його знаходження була проведена серія дослідів на лабораторній вібраційній машині [12, 13], яка була оснащена термодатчиками з відповідним обладнанням для фіксації температури сушильного агента всередині сушильної камери.

За усталеного режиму роботи вібраційної машини температура теплоносія реєструвалася в безперервному режимі. Температуру матеріалу під час відбору проб визначали за допомогою термодатчиків, при

цьому з метою мінімізації впливу навколишнього середовища відбір здійснювався протягом найкоротшого можливого часу.

Для контролю температурного поля сушильного агента вздовж робочої камери були змонтовані стаціонарні термомпари. Кожна з них фіксувала температуру в заданій точці, що відповідає певному моменту часу для встановленого значення віброприскорення. Розташування точок вимірювання обиралося таким чином, щоб час переміщення матеріалу між ними залишався однаковим. Попередні експериментальні дослідження показали, що зміна температури сушильного агента в часі має близький до лінійного характер.

У ході роботи було виконано серію експериментів з метою визначення значення коефіцієнта K_2 рівняння (7). У даній серії дослідів змінювалися параметри вібраційного впливу — амплітуда та частота коливань сушильної камери, а також початкова різниця температур між теплоносієм і матеріалом.

У кожному експерименті, тобто за сталих параметрів вібраційного впливу (амплітуди та частоти коливань сушильної камери) і початкової різниці температур між сушильним агентом і матеріалом, здійснювалося послідовне фіксування температур матеріалу та сушильного агента в часі. На основі отриманих даних розраховувався коефіцієнт теплообміну за робочою формулою.

$$k_2 = \frac{\ln(t_0 - \vartheta_0) - \ln \Delta t}{\tau} \quad (8)$$

де $(t_0 - \vartheta_0)$ — різниця температур сушильного агента і матеріалу в момент часу $\tau = 0$;

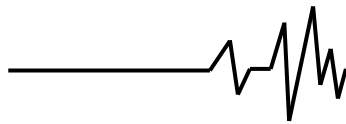
Δt — та ж різниця температур в момент часу $\tau > 0$;

τ — час від початку досліду до моменту заміру температур.

При проведенні експериментів по визначенні параметрів інтенсивності сушіння фіксували вологість матеріалу, швидкість і температуру теплоносія. Вологість матеріалу визначали стандартним способом. Для визначення температури і швидкості повітря використовували ДСТУ 8726:2017 [15].

Досліди проводили при початковій вологості матеріалу 28 % (вологівміст $U_H=0,39$). Швидкість повітря на вході в сушильну камеру була 10, 16, і 22 м/с, а його температура, відповідно, 22; 30 і 38 $^\circ\text{C}$. Всі досліди проводились згідно матриці планування експериментів у трикратній повторності.

Перша серія дослідів була проведена з метою визначення залежності коефіцієнту



теплообміну від швидкості сушильного агенту при постійній його температурі $t_{ca}=35^\circ\text{C}$ і початковій вологості матеріалу $W_n=28\%$ без вібраційного впливу. Графічні результати даних досліджень представлені на (рис.3), лінія 1.

Підвищення коефіцієнта теплообміну за рахунок вібраційного впливу може бути обґрунтоване таким чином. Дія вібрації переводить нерухомий шар волоських горіхів у квазікиплячий стан, що сприяє зниженню аеродинамічного опору шару та інтенсифікації турбулізації прикордонного шару на межі контакту «матеріал – теплоносіє». Унаслідок цього зменшується площа так званого «дзеркального шару» і, відповідно, зростає ефективна поверхня теплообміну між матеріалом і сушильним агентом. Одночасно відбувається додаткова турбулізація потоку теплоносія, що також позитивно впливає на інтенсивність процесу сушіння.

Зменшення аеродинамічного опору шару волоських горіхів було підтверджене експериментальними вимірюваннями швидкості сушильного агента на вході та виході із сушильної камери. За відсутності вібраційного впливу швидкість теплоносія зменшувалася з 22,5 м/с на вході до 2 м/с на виході, тоді як за умов вібраційного впливу швидкості на виході становила близько 5 м/с.

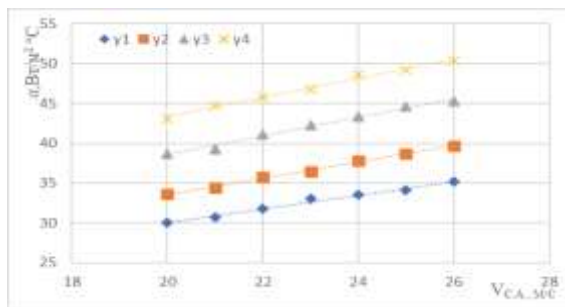


Рис. 3. Залежність коефіцієнту теплообміну від швидкості сушильного агенту при його температурі 35°C і початковій вологості матеріалу 28% : 1 – процес сушіння без вібраційного впливу ($a=0$); 2 – з вібрацією при віброприскоренні $a=25\text{ м/с}^2$; 3 – з вібрацією при віброприскоренні $a=65\text{ м/с}^2$; 4 – з вібрацією при віброприскоренні $a=105\text{ м/с}^2$

Аналітичне представлення цієї залежності з мінімальною похибкою можна описати рівнянням виду $Nu=f(Re, Pr)$ для випадку обтікання теплоносієм пучка труб, розташованих у шаховому порядку. Варто зазначити, що це критеріальне рівняння, де Nu – критерій Нуссельта, Re – критерій Рейнольдса, а Pr – критерій Прандтля.

Критерій Нуссельта (Nu) характеризує співвідношення густини дійсного теплового потоку до такого, який мав би місце в умовах

чистої теплопровідності через шар рідини (газу) товщиною l . Критерій Нуссельта визначається за формулою:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (9),$$

де α – коефіцієнт теплообміну, $\text{Вт/м}^2\text{C}$;

l – характерний розмір матеріалу (в нашому випадку – еквівалентний діаметр горіху), м;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/м}^2\text{C}$.

Залежність $Nu = f(Re, Pr)$ можна трактувати так: кількість тепла, яке переноситься (Nu) залежить від виду швидкісного поля (Re) і його зв'язком з полем температур (Pr).

Критерій Рейнольдса – показує співвідношення інерційних сил до сил в'язкості в потоці. Він визначає характер руху газу: ламінарний чи турбулентний. Критерій Рейнольдса визначається за формулою:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (10),$$

де v – швидкість потоку рідини (газу), м/с;

l – характерний розмір матеріалу (в нашому випадку – еквівалентний діаметр горіху), м;

ν – кінематична в'язкість рідини (газу), $\text{м}^2/\text{с}$.

Критерій Прандтля – міра співвідношення інтенсивності перенесення імпульсу внутрішнім тертям та інтенсивності перенесення енергії теплопровідністю в потоці газу. Критерій Прандтля визначається за формулою:

$$Pr = \frac{v}{a} \quad (11),$$

де ν – кінематична в'язкість рідини (газу), $\text{м}^2/\text{с}$;

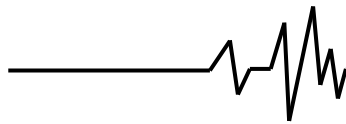
a – коефіцієнт температуропровідності газу (коефіцієнт термічної дифузії), $\text{м}^2/\text{с}$.

Для випадку реалізації процесу сушіння без застосування вібраційного впливу критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту теплообміну має наступний вигляд:

$$Nu = 0,074 Re^{0,6} Pr^{0,36} \quad (12)$$

Для випадків застосування вібраційного впливу коефіцієнт теплообміну можна розрахувати за наступною формулою [8, 16-18]:

$$\alpha_z = \alpha_{sz} (1 + 0,19 a_z^{0,87}) \quad (13),$$



де $\alpha_{\text{св}}$ – значення коефіцієнту теплообміну для даних параметрів без вібраційного впливу, Вт/м²°C;

α_{ω} – параметр вібраційного впливу, в

даному випадку віброприскорення сушильної камери, м/с².

Отримані результати досліджень підтверджують раніше висунуту гіпотезу про те, що вібраційний вплив на оброблюване середовище, завдяки формуванню псевдозрідженого стану, призводить до зниження аеродинамічного опору шару волоських горіхів. Це, у свою чергу, зумовлює підвищення коефіцієнта теплообміну та інтенсифікацію процесу сушіння у вібраційній машині.

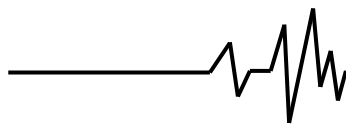
Зазначений ефект може бути пояснений, зокрема, додатковою турбулізацією потоку сушильного агента, що супроводжується зростанням числа Рейнольдса. Турбулізація теплоносія обумовлена періодичним рухом окремих елементів шару горіхів, які здійснюють зворотно-поступальні переміщення в оточенні інших частинок матеріалу. Такий характер руху з певними припущеннями може бути змодельований як зворотно-поступальний рух поршня в циліндрі. На нашу думку, запропонована модель механізму турбулізації потоку сушильного агента потребує подальшого детального дослідження.

Висновки. В ході проведеного дослідження було науково обґрунтовано вплив основних режимних параметрів на коефіцієнт тепловіддачі в конвективно-вібраційній сушарці з метою інтенсифікації процесу тепломасообміну та підвищення енергоефективності сушіння. Було встановлено, що домінуючими факторами, що визначають інтенсивність тепломасообміну, є швидкість та температура сушильного агента, геометрична структура шару матеріалу, а також параметри вібраційного впливу, зокрема амплітуда і частота коливань. Використання вібраційного впливу дозволяє створити псевдозріджений стан шару волоських горіхів, зменшити аеродинамічний опір, турбулізувати повітряний потік і підвищити коефіцієнт теплообміну до 1,5 разів порівняно з сушінням без вібрації. Розроблена методика визначення коефіцієнта теплообміну та питомих витрат енергії з урахуванням змінних температур сушильного агента, вологості матеріалу та параметрів вібраційного впливу дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність процесу та формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів функціонування сушильної системи.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні впливу різних режимів вібраційного впливу на турбулізацію повітряного потоку та формування локальних вихорів у шарі матеріалу, розробці математичних моделей процесу вібраційно-конвективного сушіння з урахуванням взаємодії окремих елементів шару та змінної геометрії матеріалу, масштабуванні результатів лабораторних досліджень на напівпромислові та промислові установки з оцінкою енергоефективності та якості продукції, вивченні комбінованих методів інтенсифікації сушіння для підвищення продуктивності та збереження біологічно активних компонентів, а також розробці рекомендацій щодо оптимізації параметрів сушильної системи для промислового виробництва волоських горіхів та подібної сировини.

Список використаних джерел

1. Kaletnik H., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prisyazhniuk D., Didyk A. Substantiation of the operating parameters of walnut drying equipment. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11(2). P. F27–F34. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).f4.
2. 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. 119–283. DOI:10.1016/j.ijheatmass-transfer.2019.119283
3. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W., Deng L., Meng X., Pan Z. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 285 (8). P. 110–105. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110105
4. Кухарець С. М., Савчук В. П., Кирилюк В. В. Технологія сушіння та зберігання горіхоплідних культур. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 9. С. 92–99.
5. Цуркан О. В., Спирін А. В., Дідик А. М., Бондаренко М. П. Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 52–59. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7.
6. Цуркан О.В., Руткевич В. С., Дідик А.М. Теоретичні дослідження процесу сушіння волоських горіхів з використанням вібраційних технологій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2023. № 4 (323). С. 337–342. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342
7. Руткевич В.С., Дідик А.М. Огляд



методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкарлупі. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки* 2023. № 1 (317). С. 230–236. DOI: [10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236)

8. Коваль В. М., Мельник С. О. Ефективність використання вібраційних сушарок у післязбиральній доробці горіхоплідних культур. *Наукові праці Подільського державного аграрно-технічного університету*. 2020. Вип. 28 (2). С. 120–126.

9. Калетнік Г.М., Цуркан О.В. Особливості конструкції вібраційного обладнання для сушіння високоволової насінневої сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 5–13. DOI: [10.37128/2306-8744-2021-1-1](https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-1)

10. ДСТУ 8900:2019. Горіхи волоські. Технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 16 с.

11. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спирін А.В., Присяжнюк Д.В., Дідик А.М., Руткевич В.С. Конвективна сушарка волоських горіхів: пат. на корисну модель № 154529, Україна, МПК F26B 3/02 (2006.01); № u2024 04770; заявл. 04.10.2024; опубл. 08.10.2025. Бюл. № 41. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1879887/>

12. Цуркан О.В., Спирін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 2 (331). С. 393–399. DOI: [10.31891/2307-5732-2024-333-2-61](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-61)

13. Цуркан О.В., Спирін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Оцінка ефективності процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 5–12. DOI: [10.37128/2306-8744-2024-3-1](https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-1)

14. Цуркан О.В., Спирін А.В., Гудзенко Н.М., Дідик А.М. Математична модель процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 5–14. DOI: [10.37128/2306-8744-2024-4-1](https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-4-1)

15. ДСТУ 8726:2017 Якість повітря. Види стаціонарних джерел. Методи визначення тиску та температури газопилових потоків. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71894 (дата звернення 28.10.2025)

16. Котов Б. І. Аналіз тенденцій підвищення паливно-енергетичної ефективності зерносушарок. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету*. 2001. Вип. 10. С. 227–232.

17. Ланець О. С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин (Кн. 1.

Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органу): навч. посіб. Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2018. 600 с.

18. Silva P.C., Resende O., Ferreira Junior W.N., Silva L.C.M., Quequeto W.D., Silva F.A.S. Drying kinetics of Brazil nuts. *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 42. Code. e64620. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.64620>.

References

1. Kaletnik, H., Tsurkan, O., Spirin, A., Gudzenko, N., Prysiazhniuk, D., & Didyk, A. (2024). Substantiation of the operating parameters of walnut drying equipment. *Journal of Engineering Sciences*, 11(2), F27–F34. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(2\).f4](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).f4). [in Ukrainian].

2. Chen, C., Venkitasamy, C., Zhang, W., Deng, 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*, 150(1), 119–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283>. [in English].

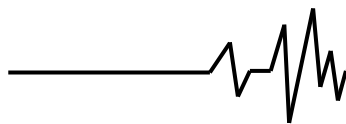
3. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W., Deng L., Meng X., & Pan Z. (2020) Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. *Journal of Food Engineering*. Vol. 285 (8). P. 110-105. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2020.110105](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110105). [in English].

4. Kukharets, S. M., Savchuk, V. P., & Kyrlyiuk, V. V. (2021). Tekhnolohiia sushinnia ta zberihannia horikhoplidnykh kultur. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 9, 92–99. [in Ukrainian].

5. Tsurkan, O. V., Spirin, A. V., Didyk, A. M., & Bondarenko, M. P. (2024). Shliakhy pidvyshchennia intensyvnosti protsesu sushinnia voloskykh horikhiv. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii*, 4(115), 52–59. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-4-7>. [in Ukrainian].

6. Tsurkan, O. V., Rutkevych, V. S., & Didyk, A. M. (2023). Teoretychni doslidzhennia protsesu sushinnia voloskykh horikhiv z vykorystanniam vibratsiinykh tekhnolohii. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: tekhnichni nauky*, 4(323), 337–342. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342>. [in Ukrainian].

7. Rutkevych, V. S., & Didyk, A. M. (2023). Ohliad metodiv ta zasobiv dlia sushinnia voloskoho horikha v shkarlupi. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: tekhnichni nauky*, 1(317), 230–236. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>



8. Koval, V. M., & Melnyk, S. O. (2020). Efektyvnist vykorystannia vibratsiinykh susharok u pisliazbyralnii dorobtsi horikhoplidnykh kultur. *Naukovi pratsi Podil'skoho derzhavnoho aharno-tekhnichnoho universytetu*, 28(2), 120–126. [in Ukrainian].

9. Kaletnik, H. M., & Tsurkan, O. V. (2021). Osoblyvosti konstruktsii vibratsiinoho obladnannia dlia sushinnia vysokovolohoi nasinnievoi syrovyny. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii*, 1(100), 5–13. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-1>. [in Ukrainian].

10. DSTU 8900:2019. (2019). *Horikhy voloski. Tekhnichni umovy*. DP «UkrNDNTS».

11. Kaletnik, H. M., Tsurkan, O. V., Honcharuk, I. V., Gudzenko, N. M., Spirin, A. V., Prysiazhniuk, D. V., Didyk, A. M., & Rutkevych, V. S. (2025). *Konvektivna susharka voloskykh horikhiv* (Patent No. 154529, Ukraine).

12. Tsurkan, O. V., Spirin, A. V., Rutkevych, V. S., & Didyk, A. M. (2024). Rozrobka konvektivno-vibratsiinoi susharki dlia sushinnia voloskykh horikhiv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: tekhnichni nauky*, 2(331), 393–399. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-61>. [in Ukrainian].

13. Tsurkan, O. V., Spirin, A. V., Rutkevych, V. S., & Didyk, A. M. (2024). Otsinka efektyvnosti protsesu sushinnia voloskykh horikhiv v konvektivno-vibratsiinii sushartsii. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii*, 3(114), 5–12. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-1>. [in Ukrainian].

14. Tsurkan, O. V., Spirin, A. V., Gudzenko, N. M., & Didyk, A. M. (2024). Matematychna model protsesu sushinnia voloskykh horikhiv v konvektivno-vibratsiinii sushartsii. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii*, 4(115), 5–14. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-4-1>. [in Ukrainian].

15. DSTU 8726:2017. (2017). *Yakist povitria. Vydy statsionarnykh dzherel. Metody vyznachennia tysku ta temperatury hazopylovykh potokiv*. Retrieved October 28, 2025, from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71894

16. Kotov, B. I. (2001). Analiz tendentsii pidvyshchennia palyvno-enerhetychnoi efektyvnosti zernosusharok. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, 10, 227–232. [in Ukrainian]. [in Ukrainian].

17. Lanets, O. S. (2018). *Osnovy rozrakhunku ta konstruuвання vibratsiinykh*

mashyn (Kn. 1. *Teoriia ta praktyka stvorennia vibratsiinykh mashyn z harmoniynym rukhom robochoho orhanu*). Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika». [in Ukrainian].

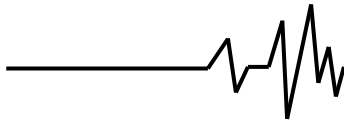
18. Silva, P. C., Resende, O., Ferreira Junior, W. N., Silva, L. C. M., Quequeto, W. D., & Silva, F. A. S. (2022). Drying kinetics of Brazil nuts. *Food Science and Technology*, 42, e64620. <https://doi.org/10.1590/fst.64620>. [in English].

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE HEAT EXCHANGE COEFFICIENT ON THE OPERATING PARAMETERS IN A CONVECTION-VIBRATION DRYER

The influence of the main operating parameters of a convective-vibratory dryer on the heat transfer coefficient is considered in order to intensify heat and mass transfer and increase the energy efficiency of the walnut drying process. It was established that the dominant factors determining the intensity of heat and mass transfer are the speed and temperature of the drying agent, the geometric structure of the material layer, as well as the parameters of the vibration effect, in particular the amplitude and frequency of oscillations. The use of vibration effect allows you to create a fluidized state of the nut layer, reduce aerodynamic resistance, increase air flow turbulence and increase the heat transfer coefficient up to 1.5 times compared to traditional convective drying. The developed methodology for determining the heat transfer coefficient and specific energy consumption taking into account variable temperatures, humidity and vibration effect parameters allows you to objectively assess the efficiency of the process and form scientifically based recommendations for optimizing operating parameters.

Prospects for further research are indicated, which include studying the influence of different vibration modes on air flow turbulence, the formation of local vortices in the material layer, the development of mathematical models of the process taking into account the interaction of individual elements and the variable geometry of nuts, scaling the results to industrial installations and developing recommendations for optimizing the drying process with increased productivity and maintaining product quality.

Keywords: vibration-convective drying, walnut, heat and mass transfer, heat transfer coefficient, drying intensification, heat transfer, drying agent, vibration effect, operating parameters, energy efficiency, denaturation of proteins and lipids, product quality.

**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, <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.

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, <https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>).

Руткевич Володимир Степанович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: v_rut@ukr.net, ORCID 0000-0002-6366-7772).

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).

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, <https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>)

Rutkevych Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 1, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua). ORCID 0000-0002-6366-7772).

Стаття надійшла 30.10.2025

Стаття прийнята 11.11.2025

Опубліковано 25.12.2025