

ЦУРКАН ОЛЕГ

Відокремлений структурний підрозділ «Ладизинський фаховий коледж

Вінницького національного аграрного університету»

<https://orcid.org/0000-0002-7218-0026>e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net**СПІРІН АНАТОЛІЙ**

Відокремлений структурний підрозділ «Ладизинський фаховий коледж

Вінницького національного аграрного університету»

<https://orcid.org/0000-0002-4642-6205>e-mail: spiranatoly16@gmail.com**РУТКЕВИЧ ВОЛОДИМИР**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6366-7772>e-mail: v_rut@ukr.net**ДІДИК АНДРІЙ**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>e-mail: anddidyk99@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СУШИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕРОБКИ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ

Представлено результати прикладних наукових досліджень щодо розроблення та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів конвективно-вібраційної сушарки для післязбиральної обробки волоських горіхів. Встановлено основні проблеми традиційних способів сушіння, зокрема нерівномірність прогрівання, втрати біологічно активних речовин і високі питомі енергетичні витрати. Запропоновано технічне рішення, що поєднує керувану конвективну подачу теплоносія та механічну вібрацію для інтенсифікації масо- і теплообміну. На основі багатофакторного математичного моделювання визначено раціональні режимні параметри сушіння за критерієм мінімізації питомої енерговитратності. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування комплексного підходу до оптимізації процесу сушіння горіхової сировини та свідчать про підвищення енергоефективності технологічного обладнання.

Ключові слова: волоські горіхи; сушіння; конвективно-вібраційна сушарка; теплоносії; енергоефективність; масообмін; математичне моделювання; режимні параметри.

TSURKAN OLEH, SPIRIN ANATOLIY

Separated structural unit «Ladyzhyn Professional College of Vinnytsia National Agrarian University»

RUTKEVYCH VOLODYMYR, DIDYK ANDRIY

Vinnytsia National Agrarian University

DETERMINATION OF OPERATING PARAMETERS OF DRYING EQUIPMENT OF A WALNUT PROCESSING LINE

The results of applied scientific research on the development and justification of the design and technological parameters of a convective-vibration dryer for post-harvest processing of walnuts are presented. The insufficient study of the mutual influence of thermal, aerodynamic and vibration factors on the energy efficiency of the walnut drying process necessitates the need for comprehensive research and the development of appropriate analytical models. This will allow determining rational design and technological parameters of the drying equipment and forming scientifically based criteria for improving technological lines for processing walnut raw materials. The main problems of traditional drying methods are identified, in particular, uneven heating, loss of biologically active substances and high specific energy consumption. A technical solution is proposed that combines controlled convective supply of the coolant and mechanical vibration to intensify mass and heat transfer. Based on experimental studies, the main design and technological parameters of the drying equipment were determined. These include: coolant temperature, its supply intensity, drying duration, product layer thickness and air circulation parameters depending on the initial moisture content of nuts. Additionally, the dependence of specific energy consumption on changes in equipment operating modes was analyzed, which allowed forming criteria for energy efficiency of the technological process. Based on multifactor mathematical modeling, rational drying operating parameters are determined based on the criterion of minimizing specific energy consumption. The results of the study confirm the feasibility of using an integrated approach to optimizing the drying process of nut raw materials and indicate an increase in the energy efficiency of the technological equipment.

Keywords: walnuts; drying; convective-vibration dryer; coolant; energy efficiency; mass transfer; mathematical modeling; operating parameters.

Стаття надійшла до редакції / Received 06.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми

Сучасний стан розвитку ринку волоських горіхів в Україні характеризується зростанням обсягів виробництва та підвищенням вимог до якості готової продукції, зумовлених орієнтацією на експорт і необхідністю відповідності міжнародним стандартам харчової безпеки [1, 2]. Післязбиральна обробка горіхової сировини, зокрема процес її сушіння, відіграє ключову роль у формуванні товарних характеристик, органолептичних властивостей і стабільності зберігання продукту [3]. Разом з тим існуючі промислові сушильні установки характеризуються низкою суттєвих недоліків, серед яких: нерівномірний розподіл теплоносія в робочій зоні, значні питомі енергозатрати, надмірна тривалість процесу зневоднення, втрати біоактивних компонентів ядра та ризик термічного ушкодження плода.

Особливої актуальності набуває проблема керованого формування режимних параметрів сушіння, що забезпечують мінімальне енергоспоживання при збереженні харчової цінності та стабільності кінцевого продукту [4, 5]. Запровадження конвективно-вібраційних технологій дозволяє інтенсифікувати масообмінні процеси, однак оптимальний добір параметрів температури, швидкості руху сушильного агента та віброприскорення є багатофакторною науково-прикладною задачею, що потребує математичного обґрунтування.

Недостатня вивченість взаємного впливу термічних, аеродинамічних і вібраційних чинників на енергетичну ефективність процесу сушіння волоських горіхів зумовлює необхідність проведення комплексних досліджень і розроблення відповідних аналітичних моделей. Це дасть змогу визначити раціональні конструктивно-технологічні параметри роботи сушильного обладнання та сформулювати науково обґрунтовані критерії для удосконалення технологічних ліній переробки горіхової сировини.

Аналіз останніх джерел

Проблематика підвищення ефективності процесів сушіння волоських горіхів розглядається у працях вітчизняних та зарубіжних дослідників, які акцентують увагу на важливості оптимізації термовологісних режимів та рівномірності теплообміну в шарі сировини [6-9]. У низці робіт відзначено, що традиційні конвективні сушильні системи характеризуються значними енергетичними втратами та тривалістю процесу, що зумовлює пошук альтернативних технологічних рішень на основі комбінованих методів теплової дії [10]. Окремі дослідження присвячені застосуванню вібраційного впливу під час сушіння рослинної сировини, який дозволяє інтенсифікувати масо- та теплообмін, зменшити товщину стаціонарного прикордонного шару повітря та прискорити видалення вологи.

Наукові публікації останніх років підтверджують перспективність використання математичного та регресійного моделювання для визначення оптимальних параметрів технологічних процесів сушіння, включаючи температуру теплоносія, швидкість його подачі та показники механічного збурення [7-9, 11]. Проте у більшості робіт наголошується на недостатній кількості експериментальних даних саме щодо сушіння горіхової продукції, що пов'язано зі специфічною будовою плода, нерівномірністю початкової вологості та вимогами до збереження органолептичних властивостей ядра. Наявні дослідження підтверджують доцільність поєднання конвективних та вібраційних методів, однак питання визначення їх раціональних параметрів залишається відкритим.

Систематизація літературних джерел свідчить, що застосування оптимізованих режимів сушіння на основі багатофакторного аналізу є перспективним напрямом підвищення енергоефективності технологічних ліній переробки волоських горіхів. Саме тому подальші дослідження мають бути спрямовані на математичне обґрунтування режимних параметрів і розроблення конструкцій сушильного обладнання нового покоління.

Метою досліджень є наукове обґрунтування раціональних технологічних параметрів роботи сушильного обладнання для переробки волоських горіхів на основі аналізу впливу температурних, аеродинамічних та вібраційних факторів на енергоефективність процесу зневоднення. Для її досягнення передбачено проведення математичного моделювання багатофакторної залежності питомих енерговитрат від режимних параметрів сушіння та визначення критичних точок функції. Реалізація поставленої мети дозволить сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації конструкції та режимів роботи конвективно-вібраційної сушарки з метою підвищення якості та енергоефективності післязбиральної переробки горіхової сировини.

Виклад основного матеріалу

У Вінницькому національному аграрному університеті проводяться прикладні наукові дослідження у межах проекту «Підвищення конкурентоспроможності аграрного сектора України у воєнний час шляхом інноваційного розвитку виробництва експортно-орієнтованих видів продукції» (№ ОК 0225U001822, термін виконання 2024–2025 рр.), що фінансується з державного бюджету [11-14]. Одним із ключових напрямів дослідження є розроблення технологічного обладнання для оптимізації процесів сушіння волоських горіхів на післязбиральному етапі їх обробки.

Встановлено, що процес сушіння волоських горіхів має низку специфічних особливостей, пов'язаних із будовою плода, неоднорідністю вологорозподілу та чутливістю ядра до підвищених температур [8, 9, 12]. Збереження органолептичних характеристик та харчової цінності продукту значною мірою залежить від раціонального вибору конструкції сушильної установки і підтримання стабільних режимів термообробки. Тому актуальним є створення обладнання, здатного забезпечити рівномірний розподіл теплоносія в робочій камері, контрольовану інтенсивність масообмінних процесів та мінімізацію енергетичних витрат.

У ході дослідження виконано аналіз чинних технічних рішень у сфері сушіння горіхової сировини та виявлено основні недоліки існуючих сушильних систем, серед яких: нерівномірність прогрівання шару продукту, втрати частини біологічно активних речовин, значна тривалість процесу та високі питомі енерговитрати. Для усунення зазначених недоліків запропоновано новий підхід до формування потоків теплоносія, що ґрунтується на оптимізації геометрії робочої зони сушарки, регулюванні швидкості руху повітряного потоку та забезпеченні контрольованої циклічності теплообміну.

Приклад виконання високоефективної конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів показаний на рис.1 [15].

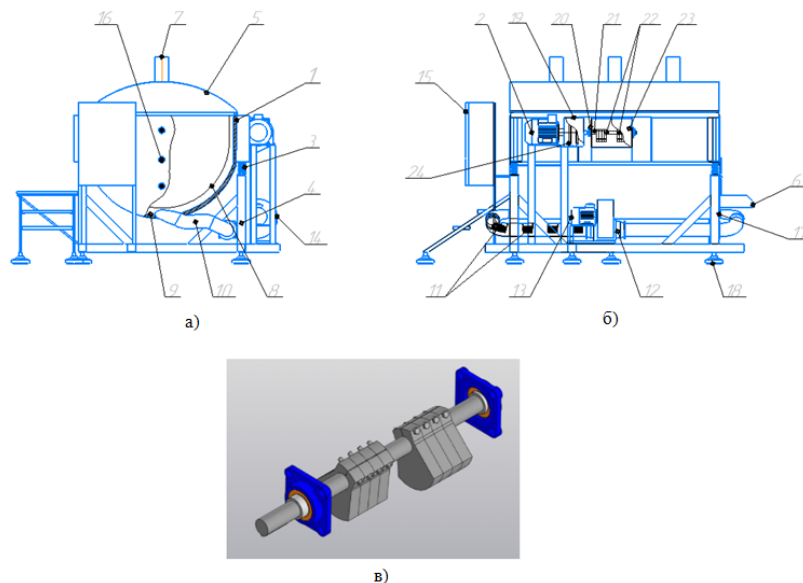


Рис.1. Конвективно-вібраційна сушарка волоських горіхів:

а) – конвективно-вібраційна сушарка, вид із боку; б) – те ж саме, вид ззаду; в) – 3-D модель дебалансного валу

Запропонована конвективно-вібраційна сушарка для волоських горіхів являє собою теплоізольовану U-подібну сушильну камеру 1, конструкція якої передбачає поєднання конвективного підведення теплоносія та інтенсивного механічного вібраційного впливу на шар горіхової маси. Сушильна камера 1 закріплена на рамі 4 за допомогою пружних елементів 3, що забезпечують її ізольоване коливальне переміщення у процесі роботи. Вібраційний вплив реалізується механічним відцентровим дебалансним збуджувачем коливань, до складу якого входить приводний електродвигун 2, еластична муфта 24 та дебалансний вал 21 з дебалансними вантажами 22, встановлений у підшипникових вузлах 20 [15, 16]. Конструктивне виконання збуджувача передбачає його закриття захисними кожухами 19 і 23, що підвищує безпеку експлуатації та зменшує теплові втрати. Регулювання інтенсивності вібраційного поля здійснюється двома способами: зміною частоти обертання приводного електродвигуна (через частотний перетворювач) та регулюванням амплітуди коливань шляхом зміни взаємного положення дебалансів (кута їх розведення). Такий підхід дозволяє цілеспрямовано впливати на умови масообміну в шарі сировини.

Верхня частина сушильної камери оснащена кришкою 5 з вбудованими повітропроводами 7 для відведення відпрацьованого повітря, що забезпечує кероване видалення вологи з робочого об'єму. Нижня частина теплоізольованої U-подібної сушильної камери 1 конструктивно включає перфороване днище 8 та піддон 9, які формують робочу зону для подачі сушильного агента (гарячого повітря) і забезпечують рівномірний розподіл потоків теплоносія по всій площі завантаженого матеріалу.

Система подачі повітря включає нагнітальний вентилятор 14, повітророзподільний пристрій 12 та лінію подачі нагрітого повітря 10, у якій встановлені теплоелектронагрівачі 11. Привод вентилятора здійснюється електродвигуном 13. Для контролю температурного режиму встановлено датчик температури 17 на вході сушильної камери, що забезпечує замір значення температури сушильного агента перед надходженням у робочу зону. У внутрішньому об'ємі сушильної камери передбачена система тривірневих датчиків 16 для контролю температури та вологості в різних зонах робочого простору, що дозволяє реалізувати автоматичну систему керування 15 для стабілізації параметрів процесу.

Рух гарячого повітря відбувається наступним чином. Нагнітальний вентилятор 14 подає повітря через повітророзподільний пристрій 12 до теплоелектронагрівачів 11 у лінії 10. Після нагрівання до заданої температури сушильний агент через піддон 9 надходить у камеру під перфороване днище 8, проходить через шар матеріалу і виводиться через повітропроводи 7. Таким чином реалізується інтенсивний масообмінний процес «повітря–матеріал–повітря», спрямований на ефективне видалення вологи з внутрішньої структури плода.

Важливою складовою розробленої конструкції є автоматичне коригування режимів сушіння. При досягненні заданих значень температури та вологості повітря автоматична система керування 15 здійснює регулювання роботи електродвигуна нагнітального вентилятора 14 та теплоелектронагрівачів 11, що дозволяє виключити перегрів продукту, запобігти пересушуванню та знизити енерговитрати. Вивантаження готового продукту здійснюється через розвантажувальний лоток 6 під дією вібраційного переміщення сушильної камери.

Таке конструктивне рішення дозволяє оперативно керувати двома ключовими групами параметрів:

- параметрами сушильного агента (температура, швидкість подачі, витрата повітря);
- параметрами вібраційного впливу (частота та амплітуда коливань).

Це забезпечує можливість адаптивного керування процесом видалення вологи залежно від вихідної вологості горіхової сировини, її фракційного складу та тепловологісних характеристик. Раціональний підбір режимних параметрів дозволяє досягти стабільного протікання масо- та теплообмінних процесів,

інтенсифікувати сушіння та мінімізувати втрати біологічно активних компонентів ядра горіха під час термообробки.

На основі експериментальних досліджень проведено визначення основних конструктивно-технологічних параметрів роботи сушильного обладнання. До них належать: температура теплоносія, інтенсивність його подачі, тривалість сушіння, товщина шару продукту та параметри циркуляції повітря залежно від вихідної вологості горіхів. Додатково проаналізовано залежність питомих енерговитрат від зміни режимів роботи обладнання, що дозволило сформулювати критерії енергоефективності технологічного процесу. В якості критерію оптимізації було вибрано кількість тепла [Мдж], затраченого на випаровування води з 1 кг горіхів початкової вологості w_k [д.о.] до кінцевої вологості [17, 18].

Для обґрунтування раціональних технологічних параметрів роботи сушильного обладнання технологічної лінії переробки волоських горіхів проведено математичне моделювання залежності питомих енергетичних витрат процесу сушіння від основних режимних факторів. У якості вихідних даних використано рівняння регресії виду [10, 12]:

$$Q = 23,066 - 0,346t + 0,00368t^2 - 1,0204v + 0,00207tv + 0,0201v^2 - 0,00655z - 0,00011tz - 0,000321vz + 0,0000823z^2 \quad (1)$$

де Q – питомі енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи;

t – температура сушильного агента, °С;

v – швидкість руху сушильного агента, м/с;

$z = A\omega^2$ – віброприскорення, яке характеризує інтенсивність вібраційного впливу.

З метою визначення екстремальних значень функції енергетичних витрат $Q(t, v, z)$ було знайдено частинні похідні щодо кожної незалежної змінної. На першому етапі обчислено частинні похідні:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= -0,346 + 0,00736t + 0,00207v - 0,00011z \\ \frac{\partial Q}{\partial v} &= -1,0204 + 0,00207t + 0,0402v - 0,000321z \\ \frac{\partial Q}{\partial z} &= -0,00655 - 0,00011t - 0,000321v + 0,000165z \end{aligned} \quad (2)$$

Наступним етапом було прирівняно отримані вирази до нуля, що дозволило сформулювати систему рівнянь для знаходження критичних точок функції:

$$\begin{cases} -0,346 + 0,00736t + 0,00207v - 0,00011z = 0 \\ -1,0204 + 0,00207t + 0,0402v - 0,000321z = 0 \\ -0,00655 - 0,00011t - 0,000321v + 0,000165z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Отримано систему трьох рівнянь з трьома невідомими. Корені цієї системи будуть критичними точками. В нашому випадку якщо вони забезпечують мінімум функції, то вони і будуть раціональними параметрами процесу сушіння волоських горіхів на конвективно-вібраційній машині.

Коренями даної системи будуть наступні значення: $t = 38^\circ\text{C}$; $v = 22,5$ м/с; $z(A\omega^2) = 65,6$ м/с². Зазначені значення відповідають точці мінімуму функції $Q(t, v, z)$, що свідчить про мінімальні питомі енергетичні витрати на випаровування одиниці маси вологи. Таким чином, знайдені параметри можна вважати раціональними режимними характеристиками роботи конвективно-вібраційної сушарки для волоських горіхів.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування комплексного підходу до оптимізації температурних, аеродинамічних та вібраційних параметрів при сушінні горіхової сировини. Визначення критичних точок багатфакторної функції забезпечує можливість практичного застосування математично обґрунтованих режимних параметрів для забезпечення енергоефективного та якісного протікання процесу зневоднення.

Висновки та пропозиції

У результаті проведених досліджень обґрунтовано ефективність застосування конвективно-вібраційного сушильного обладнання для післязбиральної обробки волоських горіхів. Встановлено, що поєднання керованої подачі теплоносія та інтенсивного механічного вібраційного впливу забезпечує формування стабільних умов масо- та теплообміну в робочому шарі продукту, що сприяє прискоренню видалення вологи з внутрішньої структури плода без втрати якісних показників ядра.

Розроблена конструкція сушарки дозволяє цілеспрямовано регулювати два ключові комплекси параметрів – термогідродинамічні та вібраційні, що розширює функціональні можливості технологічного обладнання та створює передумови для адаптивного керування процесом зневоднення залежно від вихідних характеристик горіхової сировини. Математичне моделювання процесу сушіння підтвердило доцільність вибору раціональних режимних параметрів за критерієм мінімізації питомих енергетичних витрат. Визначені оптимальні значення температури теплоносія ($t = 38^\circ\text{C}$), швидкості руху повітряного потоку ($v = 2,25$ м/с) та віброприскорення ($z = 65,6$ м/с²) забезпечують мінімальні значення функції енергоспоживання при збереженні органолептичних властивостей горіха.

Отримані результати підтверджують наукову й практичну значущість запропонованої сушильної системи, а також можливість її використання у складі технологічних ліній переробки горіхової продукції. Подальші дослідження доцільно спрямувати на удосконалення автоматизованої системи керування

сушильним процесом, дослідження динаміки вологовіддачі залежно від фракційного складу сировини та оцінювання впливу режимних параметрів на біохімічні показники готового продукту.

Література

1. Калетнік Г.М. Технологія переробки волоських горіхів / Г.М. Калетнік, О.В. Цуркан, А.В. Спірін, А.М. Дідик // Вібрації в техніці та технологіях. – 2024. – № 2 (113). С. 5–13.
2. Руткевич В.С. Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкарлупі / Руткевич В.С., Дідик А.М. // Вісник Хмельницького національного університету Серія: Технічні науки. – 2023. – № 1 (317). С. 230-236. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>
3. Kaletnik H., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prysiazniuk 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.
4. Котов Б.І., Лісецький В.О. Аналіз впливу режимів сушіння на енергетичні характеристики зерносушарок // Вісник ХДТУСГ. – Харків, 2001. – Т. 1, Вип. 8. – С. 166–170.
5. Котов Б.І. Аналіз тенденцій підвищення паливно-енергетичної ефективності зерносушарок // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – 2001. – Вип. 10. – С. 227–232.
6. Мелейчук В.М. Тепломасообмін у технологічних процесах харчової промисловості. – Суми: СумДУ, 2018. – 284 с.
7. Яропуд В.М., Лавренюк П.П. Порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень і чисельного моделювання процесу конвективного сушіння волоських горіхів // Вібрації в техніці та технологіях. – 2025. – № 2 (117). – С. 67–75. – DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-8.
8. 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.
9. 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.
10. Цуркан О.В., Спірін 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.
11. 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.ijheatmasstransfer.2019.119283.
12. 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.
13. Цуркан О.В., Спірін 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.
14. Цуркан О.В. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів / О.В. Цуркан, А.В. Спірін, В.С. Руткевич, А.М. Дідик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки – 2024. – № 2 (331). С. 393–399. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-61
15. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін 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/>
16. 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.
17. ДСТУ 8900:2019 Горіхи волоські. Технічні умови [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (дата звернення 1.08.2025)/
18. Stadnik M., Spirin A., Rutkevych V., Pushka O. Determination of dimensional and mass characteristics of walnuts // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2025. – № 2(129). – С. 33–38. – DOI: 0.37128/2520-6168-2025-2-4.

References

1. Kaletnik H.M. Tekhnolohiia pererobky voloskykh horikhiv / H.M. Kaletnik, O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, A.M. Didyk // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2024. – № 2 (113). С. 5–13.
2. Rutkevych V.S. Ohliad metodiv ta zasobiv dlia sushinnia voloskoho horikha v shkarlupi / Rutkevych V.S., Didyk A.M. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu Serii: Tekhnichni nauky. – 2023. – № 1 (317). С. 230-236. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>
3. Kaletnik H., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prysiazniuk 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.

4. Kotov B.I., Lisetskyi V.O. Analiz vplyvu rezhymiv sushinnia na enerhetychni kharakterystyky zemosusharok // Visnyk KhDTUSH. – Kharkiv, 2001. – T. 1, Vyp. 8. – S. 166–170.
5. Kotov B.I. Analiz tendentsii pidvyshchennia palyvno-enerhetychnoi efektyvnosti zemosusharok // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. – 2001. – Vyp. 10. – S. 227–232.
6. Meleichuk V.M. Teplomasoobmin u tekhnolohichnykh protsesakh kharchovoi promyslovosti. – Sumy: SumDU, 2018. – 284 s.
7. Iaropud V.M., Lavreniuk P.P. Porivnialnyi analiz rezul'tativ eksperymentalnykh doslidzhen i chyselnoho modeliuвання protsesu konvektyvnoho sushinnia voloskykh horikhiv // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2025. – № 2 (117). – S. 67–75. – DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-8.
8. 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.
9. 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.
10. Tsurkan O.V., Spirin A.V., Rutkevych V.S., Didyk A.M. Otsinka efektyvnosti protsesu sushinnia voloskykh horikhiv v konvektyvno-vibratsiini sushartsi // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2024. – № 3 (114). – S. 5–12. – DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1.
11. 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.ijheatmasstransfer.2019.119283.
12. Tsurkan O.V., Rutkevych V.S., Didyk A.M. Teoretychni doslidzhennia protsesu sushinnia voloskykh horikhiv z vykorystanniam vibratsiinykh tekhnolohii // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: tekhnichni nauky. – 2023. – № 4 (323). – S. 337–342. – DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342.
13. Tsurkan O.V., Spirin A.V., Didyk A.M., Bondarenko M.P. Shliakhy pidvyshchennia intensyvnosti protsesu sushinnia voloskykh horikhiv // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2024. – № 4 (115). – S. 52–59. – DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7.
14. Tsurkan O.V. Rozrobka konvektyvno-vibratsiinoi susharki dlia sushinnia voloskykh horikhiv / O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: tekhnichni nauky – 2024. – № 2 (331). C. 393–399. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-61
15. Kaletnik H.M., Tsurkan O.V., Honcharuk I.V., Hudzenko N.M., Spirin A.V., Prysiazhniuk D.V., Didyk A.M., Rutkevych V.S. Konvektyvna susharka voloskykh horikhiv: pat. na korysnu model № 154529, Ukraina, MPK F26B 3/02 (2006.01); № u2024 04770; zaiavl. 04.10.2024; opubl. 08.10.2025. Biul. № 41. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1879887/>
16. Lanets O.S. Osnovy rozrakhunku ta konstruiuvannia vibratsiinykh mashyn (Kn. 1. Teoriia ta praktyka stvorennia vibratsiinykh mashyn z harmoniinym rukhom robochoho orhanu) : navch. posib. – Lviv: Vyd-vo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika», 2018. – 600 s.
17. DSTU 8900:2019 Horikhy voloski. Tekhnichni umovy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (data zvernennia 1.08.2025)
18. Stadnik M., Spirin A., Rutkevych V., Pushka O. Determination of dimensional and mass characteristics of walnuts // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2025. – № 2(129). – S. 33–38. – DOI: 0.37128/2520-6168-2025-2-4.