

УДК 621.56:004.942

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНВЕКТИВНОЇ СУШАРКИ ІЗ ВЕРТИКАЛЬНИМ ГВИНТОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Лавренюк П.П., здобувач ступеня доктора філософії з галузевого
машинобудування, lavreniuk.petro.1239@gmail.com
Вінницький національний аграрний університет

Вступ. Міжнародна індустрія волоських горіхів демонструє стаłe зростання: за останнє десятиліття виробництво збільшилося майже на 40 %, а обсяги реалізації – на 116 % [1]. Попит на волоські горіхи зріс удвічі за п'ять років завдяки високій харчовій цінності та ролі як альтернативного джерела фізіологічно активних сполук. Узагальнена післязбиральна технологія обробки плодів включає очищення від оплодня, миття, сушіння й сортування. Миття підвищує вологість внутрішнього оплодня, що збільшує ризики мікробного псування. Типові значення вологості у свіжозібраних плодах: оплодень 85,3–87,9 %, шкаралупа 25–35 %, ядро 15–25 %. Для безпечного зберігання горіхи необхідно висушити до 6–10 % вологи в шкаралупі [2].

Волоські горіхи схильні до окислювального псування під час зберігання, транспортування й реалізації; хімічні відмінності між сортами та регіонами обумовлюють різний потенціал збережуваності. Відсутність простежуваності партій і методів експрес-оцінювання призводить до некоректних термінів придатності: у торгівлі понад 30 % партій мають ознаки гіркоти. З огляду на вплив світла, температури та кисню на олію горіха, післязбиральне сушіння має бути швидким, контрольованим і щадним ($T \leq 60$ °C) [2].

Метою роботи є визначення технологічних умов і обґрунтування конструктивно-режимних параметрів конвективної сушарки волоських горіхів із вертикальним гвинтовим робочим органом, що забезпечує інтенсивне й рівномірне відведення вологи при мінімальному травмуванні плодів та питомих енерговитратах.

Методи дослідження. Розроблено конструктивно-технологічну схему сушарки [3]: циліндрична сушильна камера з сітчастим конічним дном (\varnothing отворів 15 мм), під яким розташована повітряна камера; подача

теплого повітря знизу; вивантажувальний патрубок із заслінкою; у центрі – вертикальний гвинтовий робочий орган на підшипникових опорах, з'єднаний зверху з мотор-редуктором; у повітряній камері встановлено конусоподібний розподільник повітря.

Чисельне моделювання виконано у Simcenter STAR-CCM+ з використанням DEM для частинок горіхів та Ейлеревих моделей для повітряного потоку [3].

Газова фаза: повітря, $\mu = 1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; гравітація $9,8$ м/с²; $p = 101325$ Па; $T_{\text{вх}} = 60$ °С; $T_{\text{навк}} = 20$ °С. Швидкість потоку теплого повітря – $8,84$ м/с. Сітка багатогранних комірок з опорним розміром $0,001$ м.

Граничні умови: горіхи не проходять через сітку; контакти частинка–стінка описано моделлю Герца–Міндліна. Завантаження горіхів – інжектування Лагранжевої фази. Гвинтовий робочий орган обертається з частотою $n = 60$ об/хв.

План експерименту: повний факторний 3^3 (27 дослідів). Фактори та рівні: кут нахилу сітки $\alpha = 30/45/60^\circ$, частота обертання гвинтового робочого органу $n = 60/120/180$ об/хв, висота заповнення $H = 0/500/1000$ мм. Загальний час моделювання 600 с; неявний крок $\Delta t = 0,01$ с; 10 внутрішніх ітерацій на крок.

Критерії: (i) час досягнення найвищої якості змішування $T(\alpha, n, H)$, де якість оцінювали коефіцієнтом варіації δ шарів мічених частинок; (ii) продуктивність процесу змішування $Q(\alpha, n, H) = \rho \cdot V(\alpha, H) / T(\alpha, n, H)$, де $\rho = 260$ кг/м³ – насипна щільність [2, 3], $V(\alpha, H)$ – об'єм заповнення. Статистичну обробку (NonlinearModelFit) виконано у Wolfram Cloud із відбором значущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента; адекватність – за F-критерієм Фішера та коефіцієнтом кореляції.

Результати та обговорення. Візуалізація DEM-поля засвідчила інтенсивний перерозподіл шарів під дією гвинтового робочого органу. Якість змішування зростає з часом і стабілізується після ~ 432 с; максимальний коефіцієнт варіації $\delta = 0,92 \pm 0,02$. Відповідно один повний цикл якісного перемішування становить ≈ 392 с.

Поля повітря: максимальна швидкість у повітряній камері на вході $8,84$ м/с; після розподілу крізь сітку в зернистому шарі формується турбулентний режим зі зниженням до $\sim 0,88$ м/с. Температурне поле в шарі має спадний градієнт від 58 ± 2 °С (низ) до 43 ± 2 °С (верх); завдяки швидкому міксуванню ця неоднорідність не є критичною для якості сушіння при $T \leq 60$ °С.

Залежність об'єму заповненої області сушильної камери горіхами:

$$V(\alpha, H) = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \left(H + \frac{1}{3} \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \alpha \right) - \frac{1}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \operatorname{ctg} \alpha = 2,5434H + 0,760148 \operatorname{ctg} \alpha \quad (1)$$

Продуктивність процесу змішування:

$$Q(\alpha, n, H) = -1,56705 + 0,0563161 \alpha - 0,000280336 \alpha^2 + 0,00094621 H - 5,07823 \cdot 10^{-7} H^2 + 0,0280252 n - 0,000178066 \alpha n - 1,01277 \cdot 10^{-6} H n - 0,0000597783 n^2 \quad (2)$$

Для (2): $r = 0,88$; $F = 2,41 < F_T = 2,49$ – адекватність підтверджено.

Графічна інтерпретація залежності (2) представлена на рис. 1.

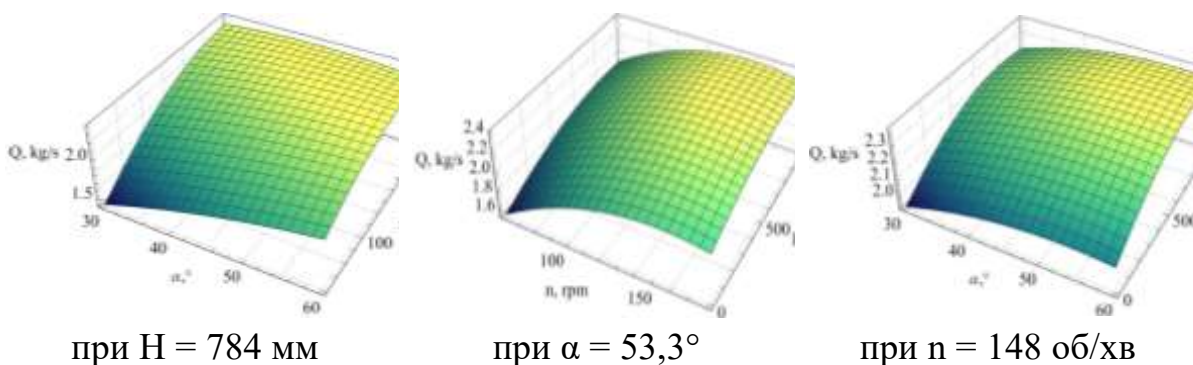


Рисунок 1 – Залежність зміни продуктивності процесу змішування шарів горіхів в області сушильної камери $Q(\alpha, n, H)$ від кута нахилу сітки відносно горизонтальної осі α , частоти обертання гвинтового робочого органу n , висоти заповнення сушильної камери волоськими горіхами H

Оптимізація критерію Q дала раціональні параметри: $\alpha = 53,3^\circ$, $n = 148$ об/хв, $H = 784$ мм; $Q_{\max} \approx 2,38$ кг/м³. На фізичному рівні зростання n і помірне збільшення H інтенсифікують перемішування, однак надмірні значення призводять до перевантаження шару та деградації Q через зростання часу T .

Висновки

1) Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему конвективної сушарки волоських горіхів із вертикальним гвинтовим робочим органом і нижнім нагнітанням повітря.

2) DEM/CFD-моделювання в STAR-CCM+ показало швидке та рівномірне перемішування шару; δ досягає $0,92 \pm 0,02$ і стабілізується після ≈ 432 с.

3) У шарі формуються корисні для сушіння потоки: турбулентний режим ($\approx 0,88$ м/с) і керований температурний градієнт $58 \rightarrow 43$ °С.

4) Отримано регресійні моделі $T(\alpha, n, H)$ і $Q(\alpha, n, H)$; за критерієм Q визначено раціональні параметри: $\alpha = 53,3^\circ$, $n = 148$ об/хв, $H = 784$ мм.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Wongso I. Drying and quality characteristics of almonds and walnuts with different drying conditions : thesis Master of Science in Biological Systems Engineering. *University of California, Davis*, 2021. 112 p.

2. Kaletnik H., Yaropud V., Kupchuk I., Aliiev E., Babyn I., Lavreniuk P. Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 12. P. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2023.12.17>.

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





ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ТА
АВТОМАТИКИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО
ВИРОБНИЦТВА НААН
України



НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
України



ІНСТИТУТ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА
ПРИРОДНИЧИХ НАУК
НАЦІОНАЛЬНОГО
ДОСЛІДНИЦЬКОГО ІНСТИТУТУ
(Польща)

МАТЕРІАЛИ
XIV-ї Науково-технічної конференції
«Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»

01-17 жовтня 2025 року

Глеваха - Київ
2025

УДК 631.171

Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: XIV Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, 1-17 жовтня 2025 року: матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2025. - 204 с.

В матеріалах конференції коротко викладені основні результати теоретичних та експериментальних досліджень з пріоритетних напрямків розвитку тваринництва та кормовиробництва. Наведені дані про ефективність результатів наукових досліджень та їх виробничої перевірки.

Матеріали розраховані на науковців та здобувачів наукового ступеня.

Організаційний комітет конференції: *Адамчук В.В.*, д.т.н., проф., академік НААН, директор Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України (голова оргкомітету); *Братишко В.В.*, д.т.н., проф., декан механіко-технологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України (співголова оргкомітету); *Штробель В.Р.*, доктор наук, директор Інституту технологічних та природничих наук Національного дослідницького інституту, Польща, (співголова оргкомітету); *Собчук Генрик*, професор, голова вченої ради Інституту технологічних та природничих наук Національного дослідницького інституту, Польща, (співголова оргкомітету); *Viacheslav Adamchuk*, д.т.н., професор і завідувач кафедри інженерії біоресурсів в Університеті McGill, Канада, (співголова оргкомітету); *Simone Pascuzzi*, д.т.н., професор кафедри агроекологічних та територіальних наук Університету Варі, Італія, (співголова оргкомітету); *Hristo Beloev*, д.т.н., професор Русенського університету, Болгарія, (співголова оргкомітету); *Maroš Korenko*, д.т.н., професор Словацького університету сільського господарства в Нітрі, Словачія, (співголова оргкомітету); *Jüri Olt*, д.т.н., професор агротехніки Естонського університету наук про життя, Естонія, (співголова оргкомітету); *Ребенко В.І.*, к.т.н., доц., доцент кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві НУБіП України (секретар оргкомітету); *Кузьменко В.Ф.*, к.т.н., с.н.с., провідний науковий співробітник відділу механіки та автоматики біотехнічних систем у тваринництві ІМА АПВ НААН; *Хмельовський В.С.*, д.т.н., проф., завідувач кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві НУБіП України; *Ткач В.В.*, к.т.н., с.н.с. завідувач відділу механіки та автоматики біотехнічних систем у тваринництві ІМА АПВ НААН; *Фененко А.І.*, д.т.н., проф., головний науковий співробітник ІМААПВ; *Голуб Г.А.*, д.т.н., проф., професор кафедри тракторів, автомобілів та біоенергосистем НУБіП України; *Собчук Генрик*, професор, голова вченої ради Інституту технологічних та природничих наук Національного дослідницького інституту, Польща; *Ревенко І.І.*, д.т.н., проф., професор кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві НУБіП України; *Роговський І.Л.*, д.т.н., проф., завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П. Момотенка; *Заболотько О.О.*, к.т.н., доц., доцент кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві НУБіП України; *Сівак І.М.*, к.т.н., доц., доцент кафедри сільськогосподарських машин і системотехніки ім. П.М. Василенка НУБіП України; *Тітова Л.Л.*, к.т.н., доц., доцент кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П. Момотенка НУБіП України.

Рекомендовано до видання:

вченою радою ІМААПВ НААН України (протокол № 5 від «21» листопада 2025 р.);
вченою радою механіко-технологічного факультету НУБіП України
(протокол № 4 від «20» листопада 2025 року)

Адреси для листування:

08631, Київська обл., Васильківський р-н, смт. Глеваха, вул. Вокзальна, 11
03041, Україна, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 12, к. 11

E-mail: ima.apv.naan@gmail.com, mtf11k@ukr.net, info@animal-conf.inf.ua

Сайт конференції: <http://animal-conf.inf.ua>

© ІМА АПВ НААН України, 2025

© НУБіП України, 2025