**Яропуд В. М.**

Д.Т.Н., доцент

Лавренюк П. П.здобувач ступеня доктора
філософії**Вінницький національний
аграрний університет****Yaropud V.**Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor**Lavreniuk P.**Candidate for the degree of Doctor
of Philosophy**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 664.694.047****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-8****ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ
РЕЗУЛЬТАТІВ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ І ЧИСЕЛЬНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ
ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ**

У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу особливого значення набуває підвищення ефективності процесів післязбиральної обробки продукції, зокрема сушіння волоських горіхів. Якість кінцевого продукту та енергоефективність процесу значною мірою залежать від рівномірності видалення вологи й стабільності температурного режиму під час сушіння. Одним із перспективних напрямів удосконалення сушильних установок є застосування методів чисельного моделювання для прогнозування параметрів процесу та оптимізації конструкції сушарок. Поєднання експериментальних досліджень із математичним аналізом дає змогу детально оцінити розподіл температури, вологості та швидкості повітряного потоку в робочій камері, що сприяє точнішому вибору режимів роботи обладнання.

У роботі використано CFD-DEM моделювання для тривимірного опису динаміки повітряного потоку та руху частинок волоських горіхів, що забезпечило оцінку локальних полів швидкостей, температури й вологості, а також інтенсивності тепло- і масообміну між фазами. Проведено повний факторний експеримент із трьома основними параметрами сушіння: частотою обертання гвинтового робочого органа, кутом нахилу сітки та висотою заповнення бункера горіхами. Для оцінювання ефективності процесу застосовано критерії середньої вологості та однорідності розподілу вологи в об'ємі бункера.

Результати чисельного моделювання підтверджено експериментально на сушарці СГК-4 «TIPAC», що забезпечило високий рівень відповідності між теоретичними та практичними залежностями часу досягнення максимальної ефективності змішування (коефіцієнт кореляції 0,79). Отримані результати свідчать про достовірність побудованої математичної моделі та її придатність для подальшої оптимізації режимів роботи сушарки, підвищення ефективності сушіння й поліпшення якості кінцевого продукту.

Ключові слова: конвективне сушіння, волоські горіхи, чисельне моделювання, експериментальні дослідження, тепломасообмінне обладнання, робочий орган, однорідність, вологість, оптимізація режимів, виробництво, параметри, обробка, процес, ефективність.



Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу особливого значення набуває підвищення ефективності процесів післязбиральної обробки продукції, зокрема сушіння волоських горіхів [1, 2]. Попит на цю культуру постійно зростає – за даними FAO, щорічне світове виробництво волоських горіхів перевищує 4,5 млн тонн, а Україна стабільно входить до десятки найбільших експортерів. Разом із цим, якість висушеного ядра залишається одним із ключових критеріїв конкурентоспроможності, оскільки навіть незначне перегрівання чи нерівномірне видалення вологи може призвести до потемніння ядра, втрати смакових властивостей і зниження ринкової вартості продукції.

Процес сушіння волоських горіхів належить до складних тепло- і масообмінних явищ, де важливу роль відіграють не лише температура й вологість повітря, а й рівномірність розподілу потоків у робочій камері. Традиційні сушильні установки, як правило, не забезпечують достатньої стабільності параметрів середовища, що зумовлює локальні зони перегріву або недосушування продукту. Це призводить до збільшення тривалості процесу, підвищення енерговитрат і зниження якості кінцевого продукту [3, 4]. У зв'язку з цим актуальним стає завдання удосконалення конструкцій сушарок і пошуку оптимальних режимів їх роботи, які дозволяють знизити питомі енерговитрати та забезпечити рівномірне висушування матеріалу.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності сушильних процесів є використання методів чисельного моделювання. Сучасні CFD-технології (Computational Fluid Dynamics) дають змогу досліджувати складні процеси переносу теплоти та вологи без потреби у великій кількості натурних експериментів [5, 6]. Зокрема, моделювання потоків у конвективних сушарках дозволяє прогнозувати просторовий розподіл температури, вологості й швидкості повітряного потоку, оцінювати вплив конструктивних елементів (дефлекторів, направляючих лопатей, перфорованих решіток) на аеродинаміку камери, а також обґрунтовувати оптимальні умови сушіння.

Поеднання експериментальних досліджень із математичним аналізом відкриває можливість створення адаптивних систем керування процесом сушіння. Такий підхід дозволяє не лише перевірити адекватність чисельних моделей, а й скорегувати їх відповідно до реальних даних, отриманих у лабораторних чи промислових умовах. Важливо, що результати моделювання можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо модернізації наявного обладнання, зокрема для покращення рівномірності температурного поля та зниження енергоспоживання.

Додатковий інтерес становить порівняння результатів експериментальних досліджень із

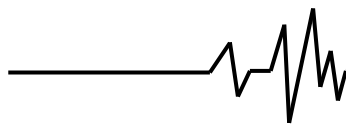
даними чисельного моделювання, адже саме на цьому етапі підтверджується достовірність обраних фізико-математичних моделей. Відповідність між теоретично розрахованими та фактичними параметрами сушильного процесу є критерієм правильності побудови моделі й свідчить про її придатність для подальшого прогнозування й оптимізації. Таке поєднання підходів дозволяє сформулювати цілісне уявлення про динаміку процесів у конвективній сушарці волоських горіхів і створює наукове підґрунтя для розробки енергоефективних, інтелектуально керованих систем післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції [7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних наукових дослідженнях спостерігається зростаючий інтерес до чисельного моделювання процесів сушіння аграрної сировини, зокрема волоських горіхів, із використанням поєднаних методів CFD (Computational Fluid Dynamics) та DEM (Discrete Element Method) [8-11]. Такі підходи дають змогу комплексно описати динаміку повітряного потоку та рух частинок, відтворити реальні умови конвективного сушіння, визначити локальні поля швидкостей, температур і вологості, а також оцінити інтенсивність тепло- і масообміну між фазами.

У роботах останніх років дослідники особливу увагу приділяють встановленню закономірностей між параметрами повітряного середовища (температурою, швидкістю, витратою повітря) та якісними показниками готової продукції – кольором, структурою ядра, вмістом біологічно активних сполук і збереженням смакових властивостей [12, 13]. Відомо, що навіть відхилення температури сушильного агента на 2–3 °C від оптимального значення може призвести до втрати до 15 % поліфенолів і до 20 % антиоксидантної активності ядра. Тому завданням дослідників стає не лише досягнення енергоефективності, а й збереження природної цінності продукту.

Розвиток CFD-DEM моделювання дозволив детально проаналізувати вплив геометрії сушильної камери, конфігурації повітряних каналів і швидкості потоку на рівномірність сушіння. Зокрема, моделі із застосуванням багатофазних підходів дають змогу простежити взаємодію частинок різного розміру та щільності, що особливо важливо для неоднорідних матеріалів, таких як горіхи з оболонкою. Використання тривимірних CFD-моделей із турбулентними моделями типу k-ε або SST дозволяє отримати просторові карти розподілу температури та вологості, на основі яких визначаються зони можливого перегріву чи застою повітря.

Водночас підкреслюється необхідність експериментальної верифікації чисельних моделей для підтвердження їхньої адекватності, що забезпечує практичну цінність таких досліджень при проектуванні та модернізації сушильних установок.



У низці робіт запропоновано методики калібрування CFD-моделей за результатами температурних і вологісних вимірювань у лабораторних сушарках, що дало змогу знизити похибку розрахунків до 5–7 %. Значний внесок у розвиток напрямку зробили роботи, присвячені вдосконаленню міжфазних коефіцієнтів тепло- і масопереносу, урахуванню внутрішньої дифузії вологи в зернівках, а також моделюванню нерівномірності нагріву матеріалу внаслідок складної форми частинок [14, 15].

Окрему увагу в сучасних публікаціях приділено дослідженню комбінованих режимів сушіння – конвективно-вібраційного, інфрачервоного, вакуумного та мікрохвильового. Такі технології дозволяють скоротити тривалість процесу в 1,5–2 рази та зменшити питомі енерговитрати на 20–30 %, водночас забезпечуючи високу якість кінцевого продукту [16, 17]. У працях азійських і європейських авторів акцентується, що комбінація CFD-DEM моделювання з оптичними методами (наприклад, тепловізійною зйомкою) створює нові можливості для просторової валідації моделей та моніторингу процесів у реальному часі.

Незважаючи на досягнуті результати, у літературі залишаються актуальними питання масштабування результатів чисельного моделювання до промислових умов, а також точного опису змін фізичних властивостей матеріалу під час сушіння. Реальна структура горіха – наявність шкаралупи, перегородок і неоднорідність ядра – істотно ускладнює моделювання, що потребує подальшого вдосконалення фізико-математичних моделей і використання адаптивних сіток.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують доцільність комплексного підходу, що поєднує CFD-DEM моделювання з

експериментальними вимірюваннями, для глибокого розуміння й оптимізації процесу конвективного сушіння волоських горіхів. Розвиток таких міждисциплінарних методів створює передумови для формування нового покоління енергоефективних сушильних систем, орієнтованих на точне керування параметрами мікроклімату в робочій камері та стабільну якість аграрної продукції.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є перевірка адекватності математичної моделі процесу конвективного сушіння волоських горіхів шляхом порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними та оцінювання її придатності для оптимізації режимів роботи сушарки й підвищення ефективності процесу сушіння.

Викладення основного матеріалу. У середовищі Simcenter STAR-CCM+ створено тривимірну модель сушарки, що включає корпус камери та гвинтовий робочий орган, який обертається навколо власної осі. Робочий орган забезпечує транспортування та механічний вплив на зернову масу під час сушіння. Геометрія моделі враховує конструктивні особливості сушарки – стінки, вхідні й вихідні патрубки, що важливо для точного відтворення умов тепло- та масообміну. Для дискретизації застосовано гібридну сітку: Surface Remesher – для створення оболонки, Polyhedral Mesher – для об'ємної сітки. Опорний розмір елемента 0,001 м забезпечує баланс між точністю й обчислювальними витратами та детальне відображення зони гвинтового органу. У результаті згенеровано об'ємну обчислювальну сітку сушарки (рис. 1), яка використовується для подальшого моделювання тепло-, масообміну та динаміки потоків.

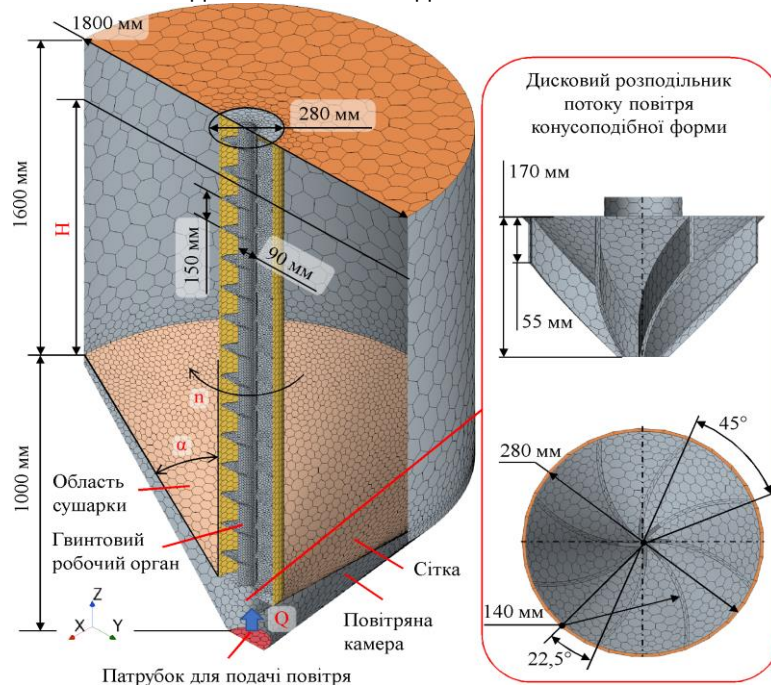
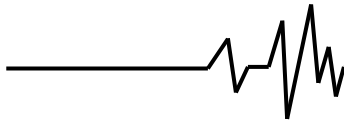


Рис. 1. Об'ємна сітки області сушарки і гвинтового робочого органу



Конструкція області сушарки (рис. 1) складається з двох основних частин: нижньої конусоподібної повітряної камери заввишки $h_{\text{cone}} = 1000 \text{ мм} = 1,0 \text{ м}$ і діаметром $D = 1800 \text{ мм} = 1,8 \text{ м}$, та верхньої циліндричної сушильної камери висотою $h_{\text{cyl}} = 1600 \text{ мм} = 1,6 \text{ м}$ з аналогічним діаметром. Розрахунок загального об'єму цієї конструкції включає суму об'ємів конуса та циліндра за такими формулами:

$$V_{\text{dryer}} = V_{\text{cyl}} + V_{\text{cone}} = \pi \frac{D^2}{4} h_{\text{cyl}} + \frac{1}{3} \pi \frac{D^2}{4} h_{\text{cone}} \approx 4,92 \text{ м}^3. \quad (1)$$

Цей об'єм забезпечує завантаження до (з урахування насипної щільності горіхів – 260 кг/м^3)

$$m_{\text{dryer}} = \rho_{\text{nut}} V_{\text{dryer}} = 1,28 \text{ т}. \quad (2)$$

З урахуванням необхідного технологічного резерву (приблизно 40 % вільного простору для циркуляції повітря), оптимальна робоча маса завантаження становить близько 60 % від максимального об'єму, тобто $m_{\text{dryer}} \approx 0,76 \text{ т}$.

Гвинтовий робочий орган діаметром $D_{\text{scr}} = 0,28 \text{ м}$ з валом діаметром $d_{\text{scr}} = 0,09 \text{ м}$ і кроком $S_{\text{scr}} = 0,15 \text{ м}$ встановлюється по центру камери. Продуктивність шнека обчислюється за формулою:

$$Q_{\text{scr}} = A_{\text{scr}} \cdot S_{\text{scr}} \cdot n_{\text{scr}} \cdot \rho_{\text{nut}} \cdot \eta = 0,248 - 0,743 \text{ кг/с} = 0,893 - 2,645 \text{ т/год}, \quad (3)$$

де $A_{\text{scr}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{scr}}^2 - d_{\text{scr}}^2) = 0,0552 \text{ м}^2$ – площа між

витком і валом; $S_{\text{scr}} = 0,15 \text{ м}$ – крок гвинта; $n = 15-45 \text{ об/хв} = 0,25-0,75 \text{ об/с}$; $\rho_{\text{nut}} = 260 \text{ кг/м}^3$ – насипна густина горіхів; $\eta = 0,46$ – коефіцієнт заповнення.

Це означає, що за умов середньої швидкості обертання шнек здатний перемістити масу горіхів, що в кілька разів перевищує робоче завантаження сушарки. Згідно з лабораторними дослідженнями, мінімальний час сушіння горіхів складає щонайменше 5 годин. Тоді мінімальна середня продуктивність сушарки повинна становити: $0,152 \text{ т/год}$. Тобто кожна частина продукту циркулює через робочу зону щонайменше 6 разів, а при мінімальній швидкості обертання – до 18 разів, що повністю забезпечує ефективне перемішування, виключає злежування та сприяє рівномірному сушінню.

Особливу увагу приділено конструкції дискового розподільника повітря, який встановлюється в нижній частині камери, безпосередньо над патрубком нагнітання потоку повітря. Розподільник має конусоподібну форму з діаметром $D_{\text{dist}} = 0,28 \text{ м}$, висотою $h_{\text{dist}} = 0,18 \text{ м}$ та рифлями у формі гвинтових спіралей (радіус вигину 140 мм , кількість – 8 шт). Його функція – перетворити осьовий потік повітря в радіальний та створити вихровий рух. Це підвищує коефіцієнт тепловіддачі за рахунок турбулізації потоку, згідно з принципом подібним до аксіально-радіального вентилятора.

За нагнітанням потоку повітря $Q_a = 2000 \text{ м}^3/\text{год} = 0,55 \text{ м}^3/\text{с}$ і діаметром патрубка $D_{\text{dist}} = 0,28 \text{ м}$ площа перерізу і середня швидкість повітря складає

$$v_a = \frac{Q_a}{A_a} = \frac{4Q_a}{\pi D_{\text{dist}}^2} = 8,93 \text{ м/с}. \quad (4)$$

На наступному етапі моделювання в Simcenter STAR-CCM+ виконано вибір фізичних моделей для опису поведінки газового й твердого середовищ у сушарці. Застосовано тривимірну нестационарну неявну модель, що враховує зміну параметрів у просторі та часі. Повітря розглядалося як ідеальний газ; турбулентність моделювалась за допомогою моделі k-ε, а рух потоку описувався усередненими рівняннями Нав'є–Стокса з урахуванням турбулентності та інерційних сил. Для стабільності розрахунків активовано опції segregated flow, gradient i bounds. Тверда фаза – частинки плодів волоського горіха – моделювалась у Лагранжевому підході з використанням DEM для опису контактних взаємодій. Враховано гравітацію, силу опору, градієнт тиску та контактні властивості: коефіцієнт Пуассона 0,25; модуль Юнга 0,3 МПа; щільність 600 кг/м^3 ; коефіцієнт тертя 0,51; коефіцієнти відновлення 0,45; опір коченню 0,25. Ефективний діаметр частинок – $0,030 \text{ м}$ ($0,022-0,038 \text{ м}$) із нормальним розподілом. Сила взаємодії описувалась моделлю Герца–Міндліна. Повітря як сушильний агент характеризувалося в'язкістю $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, тиском 101325 Па , температурою на вході 60°C і гравітаційним прискоренням $9,8 \text{ м/с}^2$. Застосована комбінація моделей забезпечує комплексне відтворення процесів тепло- та масообміну між повітряним потоком і частинками горіхів, що дає змогу аналізувати температурні поля, швидкість потоку та рівномірність сушіння. Схема симуляції моделювання процесу сушіння волоських горіхів наведена на рис. 2.

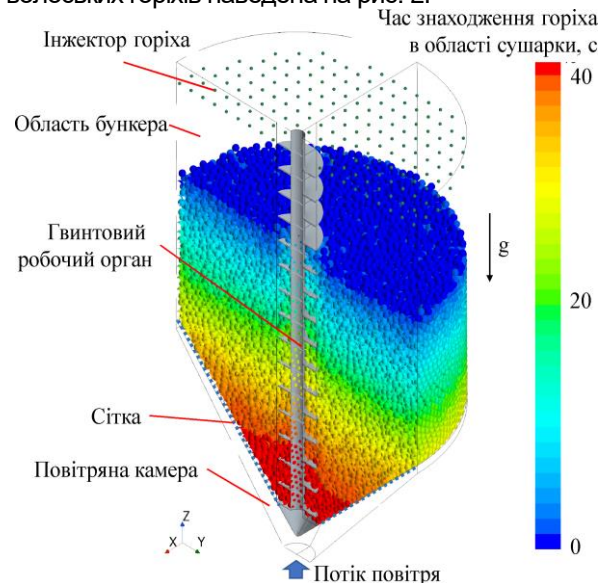
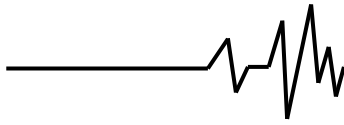


Рис. 2. Схема симуляції сушіння волоських горіхів

Завантаження плодів волоського горіха до сушильної камери моделювалося за допомогою інжекційної функції Лагранжевої фази,



яка відтворює реалістичний процес надходження частинок у робочу зону. Задано такі параметри: ймовірність появи частинок – 0,7; початкова швидкість – 0 м/с; інтенсивність завантаження – 100 частинок/с, що забезпечує стабільне та рівномірне заповнення бункера.

Перемішування й транспортування горіхів здійснював гвинтовий робочий орган, який обертався навколо власної осі. Повітряний потік зі швидкістю 8,84 м/с (1000 м³/год) забезпечував інтенсивний теплообмін і рівномірне висушування частинок. Взаємодію горіхів зі стінками сушильної камери описано за моделлю Герца–Міндліна з такими параметрами: коефіцієнт тертя – 0,51, коефіцієнт відновлення – 0,45. Поверхня сітки моделювалася як непроникна для твердих частинок, але проникна для повітря, що відповідає умовам роботи реальних конвективних сушильних систем.

Тривалість симуляції становила 900 с при часовому кроці 0,01 с та десяти ітераціях на кожен крок розрахунку, що дало змогу точно відтворити динаміку зміни швидкостей, тиску й руху частинок у процесі сушіння.

У моделюванні враховано три основні фактори, що впливають на ефективність процесу: частоту обертання гвинтового робочого органу ($n = 15 \dots 45$ об/хв), кут нахилу сітки ($\alpha = 30 \dots 60^\circ$) та висоту заповнення бункера горіхами ($H = 0 \dots 1000$ мм). Для кожного фактора задано три рівні варіювання, що забезпечило проведення повного факторного експерименту за

схемою $3^3 = 27$ дослідів.

Якість змішування визначалася за коефіцієнтом варіації:

$$\delta = 100 \left(1 - \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \right) \quad (5)$$

де $\bar{C}$ – середня концентрація мічених горіхів в загальному об'ємі; C_i – концентрація мічених горіхів в i -му шарі; n – кількість шарів.

У середовищі Wolfram Cloud виконано регресійний аналіз для побудови рівнянь другого порядку, що описують залежність ефективності змішування сипких компонентів від основних факторів. Такий підхід дав змогу врахувати лінійні, квадратичні та взаємодійні ефекти, характерні для багатофакторних технологічних процесів.

Для експериментальної перевірки отриманих залежностей виготовлено дослідний зразок конвективної сушарки СГК-4 «ТІРАС» на базі ТОВ «Краснянське СП Агроماش» (Вінницька обл., с. Красне) [18]. Конструкцію установки розроблено з урахуванням оптимальних конструктивно-режимних параметрів, визначених у другому розділі дослідження, що забезпечило підвищену ефективність її роботи.

Зовнішній вигляд експериментальної сушарки та гвинтового робочого органу наведено на рис. 3.



а



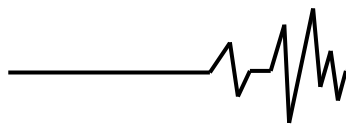
б



в

а – фронтальний вигляд; б – гвинтовий робочий орган; в – система підігрівання та нагнітання повітря у бункер.

Рис. 3. Загальний вигляд сушарки волоських горіхів



Привід гвинтового робочого органа здійснюється мотор-редуктором ЗМП-31,5 (45 об/хв, 225 Н·м), який забезпечує стабільну роботу механізму. Система підігріву повітря побудована на базі агрегату Термія АО ЕВО 24,0/1,3 ТП (3×400В) із заміненним вентилятором ВР 287-46, що покращило аеродинаміку (рис. 3). Експерименти проводилися на підприємстві «ЯФК-ВІТОН» (с. Велика Кісниця, Вінницька обл.) на свіжозібраних горіхах сорту Чандлер врожаю 2024 р. з початковою вологістю 22–28 %. Режим сушіння: 80 °С – 2 год, далі 60 °С до досягнення необхідної вологості, що забезпечує збереження якості продукції. Виділено три основні фактори процесу: частота обертання гвинта ($n = 15 \dots 45$ об/хв), нагнітання повітря ($Q = 800 \dots 2000$ м³/год) та тривалість сушіння ($t = 0 \dots 14$ год).

Основними критеріями оцінювання ефективності сушіння обрано такі показники:

- середня вологість горіхів (w_μ , %) – визначає середній вміст вологи у всій партії;
- однорідність вологості (Θ_w , %) – характеризує рівномірність розподілу вологості по всьому об'єму горіхів у бункері:

$$\Theta_w = 100 \left(1 - \frac{w_\sigma}{w_\mu} \right) \quad (6)$$

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

Чисельне моделювання та експериментальні дослідження взаємодоповнюють одне одного й дозволяють

отримати цілісне уявлення про технологічний процес сушіння волоських горіхів у конвективній сушарці. Водночас окремі рівняння, отримані в результаті моделювання та експериментів, підлягають порівнянню для оцінки їхньої достовірності та адекватності опису реального процесу.

Залежності, які можна порівняти, є залежність зміни часу t , при якому досягається найвища якість змішування (5), отримана в результаті чисельного моделювання, та залежність зміни однорідності вологості горіхів у бункері Θ_w (6), встановлена за результатами експериментальних досліджень.

Виконаємо перетворення рівняння шляхом прирівнювання його до значення 95 % та вираження часу t через інші фактори:

$$t = (8,00002 + 0,308854 n - 0,0131646 Q - 0,000142677 n Q + 3,71928 \cdot 10^{-6} Q^2) / (-0,357168 - 0,00799495 n + 0,000140711 Q). \quad (7)$$

Далі зафіксуємо окремі фактори на визначених раціональних рівнях: $\alpha = 46,5^\circ$, $H = 711$ мм, $Q = 1690$ м³/год:

– рівняння теоретичне:

$$t = 13,5996 - 0,318527 n + 0,00160247 n^2, \quad (8)$$

– рівняння експериментальне:

$$t = (-3,62554 + 0,0677298 n) / (-0,119367 - 0,00799495 n). \quad (9)$$

Графічну візуалізацію результатів наведено на рис. 4. Коефіцієнт кореляції між залежностями (8) і (9) становить 0,79, що свідчить про високий рівень кореляції згідно зі шкалою Чеддока.

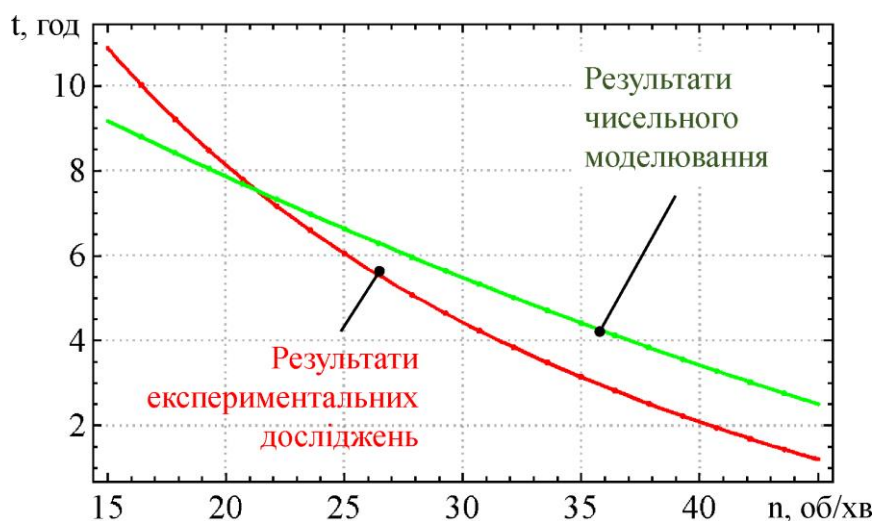
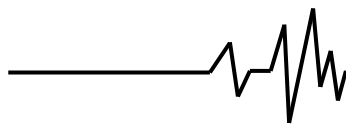


Рис. 4. Результати порівняння зміни часу t , за якого досягається найвища якість змішування t залежності (9), отриманої за результатами чисельного моделювання, із залежністю (8), отриманою за результатами експериментальних досліджень

Отримане значення підтверджує чисельного моделювання з достатню адекватність математичної моделі експериментальними даними. Невеликі відхилення у значеннях окремих точок процесу сушіння та узгодженість результатів



пояснюються впливом випадкових чинників, зокрема коливанням температури навколишнього середовища й неоднорідністю структури матеріалу. Таким чином, побудована модель може бути використана для подальшої оптимізації режимів роботи сушильної установки та прогнозування ефективності процесу за різних параметрів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Чисельне моделювання та експериментальні дослідження підтвердили взаємну узгодженість і достовірність отриманих результатів, що забезпечує комплексне розуміння процесу сушіння волоських горіхів у конвективній сушарці. Порівняння теоретичної та експериментальної залежностей часу досягнення максимальної ефективності змішування показало високий рівень відповідності між ними (коефіцієнт кореляції 0,79), що свідчить про адекватність побудованої математичної моделі реальному процесу та її придатність для подальшої оптимізації конструктивно-режимних параметрів сушіння.

Отримані результати дають підстави стверджувати, що застосування CFD-DEM моделювання є ефективним інструментом для прогнозування динаміки повітряних потоків і руху частинок у робочій камері сушарки. Це дозволяє визначати оптимальні режими роботи обладнання ще на етапі проєктування, скорочуючи обсяг натурних експериментів і витрати енергоресурсів. Експериментальна перевірка моделі на дослідній установці СГК-4 «TIPAC» підтвердила її практичну придатність і показала підвищення ефективності процесу сушіння за умови раціонального поєднання частоти обертання гвинтового робочого органа, кута нахилу сітки та висоти завантаження бункера.

У подальших дослідженнях доцільно зосередити увагу на розробленні адаптивної системи керування сушінням, що в реальному часі коригуватиме параметри температури і вологості повітря на основі математичної моделі, забезпечуючи стабільну якість готової продукції та енергоефективність процесу.

Список використаних джерел

1. Меженський В. М. *Волоський горіх (Juglans regia L.)*. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 533 с. ISBN 978-617-520-015-5.
2. Поперечний А. М., Корнійчук В. Г. Цінність горіхової сировини та передумови до процесів її переробки. *Обладнання та технології харчових виробництв: збірник наукових праць*. Київ, 2009. Вип. 20. 5 с.
3. Chen C., Zhang W., Venkitasamy C., Khir R., McHugh T., Pan Z. Walnut structure and

its influence on the hydration and drying characteristics. *Drying Technology*. 2019. Vol. 38, No. 8. P. 975–986. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1605610>

4. Wang W., Jung J., McGorin R. J., Traber M. G., Leonard G. C., Zhao Y. Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.). *LWT – Food Science and Technology*. 2018. Vol. 90. P. 526–534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.002>

5. 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, No. 12. P. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2023.12.17>

6. Яропуд В. М., Шаргородський С. А., Луц П. М., Лавренюк П. П. Симуляція процесу сушіння волоських горіхів у конвективній сушарці. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 3 (118). С. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-13>

7. Лавренюк П. П. Експериментальні дослідження процесу сушіння волоських горіхів у конвективній бункерній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-13>

8. Алієв Е. Б. *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник*. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>

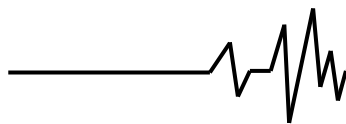
9. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Симуляція процесу тепломасообміну теплообмінника побічно-випарного типу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 4–15. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-1-1>

10. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Результати чисельного моделювання геотермального охолодження у вентиляційній системі тваринницьких приміщень. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 3 (106). С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-3-1>

11. Калетнік Г. М., Яропуд В. М., Полевода Ю. А. Чисельне моделювання процесу сушіння активним вентиляванням продуктів фракційної переробки бобових трав у конвективній стрічковій сушарці. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-1>

12. Ceylan İ., Aktaş M. Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural networks. *Applied Energy*. 2008. Vol. 85. P. 841–854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.10.013>

13. Asiru W. B., Raji A. O., Igbeka J. C.,



Elemo G. N. Mathematical modelling of thin layer dried cashew kernels. *Nigerian Food Journal*. 2013. Vol. 31. P. 106–112. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30083-7](https://doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30083-7)

14. Henderson S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 1974. Vol. 17. P. 1167–1168. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.37052>

15. Dincer I., Dost S. A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. *International Journal of Energy Research*. 1996. Vol. 20. P. 531–539. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X)

16. Яропуд В. М., Лавренюк П. П. Шляхи удосконалення конструкції конвективної сушарки волоських горіхів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 1 (120). С. 120–131. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-1-14>

17. Fernandes N. J., Ataide C. H., Barrozo M. A. S. Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2009. Vol. 26. P. 331–341.

18. Калетник Г. М., Яропуд В. М., Шаргородський С. А., Лавренюк П. П. *Конвективна сушарка волоських горіхів : пат. на корисну модель № 153978, Україна, МПК F26B 11/12 (2006.01); № u202300675; заявл. 20.02.2023; опубл. 27.09.2023, Бюл. № 39.*

References

1. Mezhenyskyi, V. M. (2020). *Walnut (Juglans regia L.)*. Kyiv: Lira-K Publishing House. 533 p. ISBN 978-617-520-015-5. [in Ukrainian].

2. Poperechnyi, A. M., & Kornichuk, V. H. (2009). The value of walnut raw materials and prerequisites for their processing. *Equipment and Technologies of Food Production*, (20), 5 p. Kyiv. [in Ukrainian].

3. Chen, C., Zhang, W., Venkitasamy, C., Khir, R., McHugh, T., & Pan, Z. (2019). Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics. *Drying Technology*, 38(8), 975–986. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1605610> [in English].

4. Wang, W., Jung, J., McGorin, R. J., Traber, M. G., Leonard, G. C., & Zhao, Y. (2018). Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.). *LWT – Food Science and Technology*, 90, 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.002> [in English].

5. Kaletnik, H., Yaropud, V., Kupchuk, I., Aliiev, E., Babyn, I., & Lavreniuk, P. (2023). Modeling of the technological process of walnut

drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*, 99(12), 91–97. <https://doi.org/10.15199/48.2023.12.17> [in English].

6. Yaropud, V. M., Sharhorodskyi, S. A., Luts, P. M., & Lavreniuk, P. P. (2022). Simulation of the walnut drying process in a convective dryer. *Engineering, Energy, Transport of AIC*, 3(118), 101–109. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-13> [in Ukrainian].

7. Lavreniuk, P. P. (2024). Experimental studies of the walnut drying process in a convective bunker dryer. *Vibrations in Engineering and Technology*, 3(114), 111–119. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-13> [in Ukrainian].

8. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes: textbook*. Kyiv: Agrarian Science. 340 p. ISBN 978-966-540-584-9. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in English].

9. Kaletnik, H. M., & Yaropud, V. M. (2022). Simulation of heat and mass transfer process in an indirect evaporative heat exchanger. *Engineering, Energy, Transport of AIC*, 1(116), 4–15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-1-1> [in English].

10. Kaletnik, H. M., & Yaropud, V. M. (2022). Results of numerical modeling of geothermal cooling in the ventilation system of livestock premises. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 3(106), 5–12. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-3-1> [in Ukrainian].

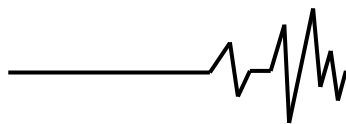
11. Kaletnik, H. M., Yaropud, V. M., & Polievoda, Yu. A. (2023). Numerical modeling of the drying process with active ventilation of fractionated legume products in a convective belt dryer. *Engineering, Energy, Transport of AIC*, 2(121), 5–15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-1> [in English].

12. Ceylan, İ., & Aktaş, M. (2008). Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural networks. *Applied Energy*, 85, 841–854. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.10.013> [in English].

13. Asiru, W. B., Raji, A. O., Igbeka, J. C., & Elemo, G. N. (2013). Mathematical modelling of thin layer dried cashew kernels. *Nigerian Food Journal*, 31, 106–112. [https://doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30083-7](https://doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30083-7) [in English].

14. Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17, 1167–1168. <https://doi.org/10.13031/2013.37052> [in English].

15. Dincer, I., & Dost, S. (1996). A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid



objects. *International Journal of Energy Research*, 20, 531–539. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X) [in English].

16. Yaropud, V. M., & Lavreniuk, P. P. (2023). Ways to improve the design of a convective walnut dryer. *Engineering, Energy, Transport of AIC*, 1(120), 120–131. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-1-14> [in English].

17. Fernandes, N. J., Ataide, C. H., & Barrozo, M. A. S. (2009). Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26, 331–341. [in English].

18. Kaletnik, H. M., Yaropud, V. M., Sharhorodskiy, S. A., & Lavreniuk, P. P. (2023). *Convective walnut dryer: utility model patent No. 153978, Ukraine, IPC F26B 11/12 (2006.01); application No. u202300675; filed 20.02.2023; published 27.09.2023, Bulletin № 39.* [in Ukrainian].

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL MODELING OF THE CONVECTIVE DRYING PROCESS OF WALNUTS

In the current conditions of agro-industrial complex development, increasing the efficiency of post-harvest processing, particularly the drying of walnuts, is of great importance. The quality of the final product and the energy efficiency of the process largely depend on the uniformity of moisture removal and the stability of the temperature regime during drying. One of the promising directions for improving drying units is the use of numerical modeling methods to predict

process parameters and optimize dryer design. The combination of experimental research with mathematical analysis makes it possible to evaluate in detail the distribution of temperature, humidity, and air velocity fields within the working chamber, thus ensuring a more accurate selection of the equipment's operating modes.

In this study, CFD-DEM modeling was applied to provide a three-dimensional description of the dynamics of the air flow and the movement of walnut particles, enabling the assessment of local velocity, temperature, and humidity fields, as well as the intensity of heat and mass transfer between phases. A full factorial experiment was carried out with three main drying parameters: screw rotation speed, screen inclination angle, and bunker filling height. The efficiency of the process was evaluated using the criteria of average moisture content and uniformity of moisture distribution within the bunker volume.

The results of numerical modeling were experimentally verified on the SGK-4 «TIRAS» dryer, which demonstrated a high level of correspondence between theoretical and experimental dependencies of the time required to achieve maximum mixing efficiency (correlation coefficient 0.79). The obtained results confirm the reliability of the developed mathematical model and its applicability for further optimization of the dryer's operating parameters, improving drying efficiency, and enhancing the quality of the final product.

Keywords: convective drying, walnuts, numerical modeling, experimental studies, heat and mass exchange equipment, working body, uniformity, humidity, mode optimization, production, parameters, processing, process, efficiency.

Відомості про авторів

Яропуд Віталій Миколайович – доктор технічних наук, доцент, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com, ORCID 0000-0003-0502-1356).

Лавренюк Петро Петрович – здобувач ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: lavreniuk.petro.1239@gmail.com, ORCID 0000-0002-2480-7365).

Yaropud Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Engineering and Technology Faculty, Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com, ORCID 0000-0003-0502-1356).

Lavreniuk Petro – Candidate for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 Industrial Mechanical Engineering in Industrial Mechanical Engineering of the Department of «Machinery and Equipment for Agricultural Production» of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: lavreniuk.petro.1239@gmail.com, ORCID 0000-0002-2480-7365).