



УДК 66.047.45

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-13

**СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ СУШАРЦІ**

**Яропуд Віталій Миколайович**, к.т.н., доцент  
**Шаргородський Сергій Анатолійович**, к.т.н., доцент  
**Луц Павло Михайлович**, к.т.н., старший викладач  
**Лавренюк Петро Петрович**, аспірант  
Вінницький національний аграрний університет

**Vitalii Yaropud**, Ph.D., Associate Professor  
**Serhiy Shargorodskiy**, Ph.D., Associate Professor  
**Pavlo Luts**, Ph.D., Senior Lecturer  
**Petro Lavreniuk**, Postgraduate  
Vinnytsia National Agrarian University

*Волоські горіхи у світі цінуються за поживні і лікувальні властивості плодів та різностороннє їх застосування. Зокрема, вони широко використовуються у кондитерській, оліє-жировій, борошномельній, фармацевтичній, хімічній, кормовій, лакофарбовій та інших галузях. Для забезпечення безпеки врожаю волоських горіхів необхідне їх висушування. Вимоги до вологості цілих волоських горіхів становлять не вище 10%. Вологість цілих горіхів після збирання може досягати 35-45%, тому необхідно проводити сушіння для доведення їх до кондиції. Сушіння цілих горіхів в Україні виконують, як правило, в природних умовах у критих провітрюваних приміщеннях. Пов'язано це з тим, що фізично важко суттєво прискорити процес сушіння цілих горіхів за допомогою спеціального обладнання. До того ж, це економічно неефективно, оскільки потребує значних витрат на енергоносії. Проте якщо обсяг волоських горіхів значний, то без спеціального сушильного обладнання обійтися важко. Тому деякі підприємства застосовують примусове сушіння цілих горіхів за допомогою різноманітних сушильних камер, щоб не допустити їх псування.*

*Мета досліджень полягає в обґрунтуванні конструктивно-технологічної схеми конвективної сушарки волоських горіхів і проведенні симуляції технологічного процесу сушіння.*

*За результатами досліджень розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему конвективної сушарки волоських горіхів, яка виконана у вигляді сушильної камери із вертикальним гвинтовим робочим органом з нижнім нагнітанням потоку теплого повітря.*

*З використанням програмного пакету Star CCM+ проведено симуляцію технологічного процесу сушіння у розробленій конвективній сушарці. Отримано візуалізацію процесу перерозподілу (перемішування) плодів волоських горіхів у сушильній камері під дією гвинтового робочого органу і розподілу швидкості потоку повітря та температури по сушильній камері конвективної сушарки. За коефіцієнтом варіації встановлено, що якість перемішування є найкращою ( $\delta = 0,92 \pm 0,02$ ) і залишається на цьому рівні через 392 с з моменту початку обертання гвинтового робочого органу. Встановлено, що в робочій зоні сушарки спостерігається градієнт температури: в нижній частині температура складає  $58 \pm 2$  °C, у верхній –  $43 \pm 2$  °C. Враховуючи досить швидке перемішування (392 с) така різниця температур є не критичною.*

*Для більш детального обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів розробленої конвективної сушарки волоських горіхів необхідно провести повноцінне чисельне моделювання. За фактори досліджень пропонується обрати: кут конусоподібної сітки, об'єм сушильної камери, діаметр, крок і швидкість обертання гвинтового робочого органу, швидкість і температуру вхідного потоку повітря. За критерії оцінювання варто обрати коефіцієнт варіації перерозподілу шарів горіхів, їх середню температуру, найменшу швидкість потоку повітря в завантаженому об'ємі волоських горіхів.*

**Ключові слова:** процес, параметри, дослідження, сушіння, волоський горіх, конвекція, сушарка.

**Ф. 1. Рис. 6. Літ. 15.**

---

**1. Постановка проблеми**

Нова технічна база в сучасних умовах сільськогосподарського виробництва повинна ґрунтуватись на технологічних прийомах, які забезпечують можливість післязбирального оброблення



за місцем його виробництва в необхідні для виробника строки. У таких умовах при розробленні нової техніки доцільно орієнтуватися на реалізацію технологій, які використовують енерго- і ресурсоощадні принципи сушіння без втрати якості й кількості насіння [1].

Для практичної реалізації таких технологій, як показує досвід, необхідно мати комплекси машин і агрегатів для оброблення насіння в господарствах (з малими об'ємами виробництва), для яких економічно не вигідно придбання і утримання високопродуктивної техніки [1].

Міжнародна індустрія виробництва та переробки горіхів в останні десятиліття активно розвивається та характеризується найвищими темпами зростання порівняно з іншими видами агропромислового бізнесу. За останні 10 років світове виробництво горіхів збільшилося майже на 40 %, а обсяги реалізації – на 116 % [2].

Особливо різкий стрибок попиту встановлено для волоських горіхів, як найважливішого альтернативного джерела основних фізіологічно активних сполук, які замінюють продукти харчування тваринного походження. У світі за останні п'ять років встановлено збільшення обсягів споживання волоських горіхів у 2 рази [2].

Волоські горіхи відносяться до продуктів, які найбільш схильні до ризику псування шляхом окислення на етапах зберігання, транспортування та реалізації. Водночас потрібно враховувати, що конкретні ботанічні сорти, вирощені у різних географічних регіонах, мають індивідуальний хімічний склад, що визначає інтенсивність окислювальних процесів, які протікають, тому горіхи різних партій мають різний потенціал до зберігання [2, 3]. Відсутність системи простежування партій горіхів, які закупаються на етапах виробництва, логістики та реалізації, а також відсутність об'єктивних методів оцінювання потенційного рівня зберігання, призводить до некоректного встановлення термінів придатності волоських горіхів, і як наслідок, у торгових мережах реалізується понад 30 % волоських горіхів з ознаками гіркого смаку [3].

Тому, актуальним завданням наукових досліджень є визначення технологічних умов і обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів для сушіння волоських горіхів і подальшого їх зберігання.

---

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

---

Процес сушіння є одним із найдавніших методів збереження сільськогосподарської продукції [4, 5]. Тому сушіння має вирішальне значення в ході післязбиральної переробки горіхів для гарантування безпечності та якості харчових продуктів під час зберігання. Рекомендований безпечний вміст вологи для горіха у шкаралупі становить 6-10 % [6]. Зневоднення є одним із найкращих методів консервування, який може подовжити термін придатності харчових продуктів і використовується для сушіння та збереження фруктів протягом кількох століть [7]. Метод заснований на видаленні вологи, яка міститься в продукті, за допомогою комплексного процесу з одночасним тепло- і масообміном.

Традиційний метод сушіння заснований на сонячній енергії, але продукти можуть бути легко зіпсовані внаслідок різних умов навколишнього середовища, які можуть призвести до значної втрати якості горіхів [8]. Крім того, неоднорідність внутрішньої структури плодів в межах одного сорту або навіть одного плоду призводить до того, що рослинна тканина є матеріалом, сприйнятливим до різних типів термічних, механічних або ферментативних процесів. Технологічна обробка змінює структуру сирих плодів, модифікуючи не тільки ферментативні реакції, що відбуваються в тканині, але, перш за все, впливаючи на умови тепло- та масообміну, які відбуваються в рослинному матеріалі [9]. Крім того, небажаний діапазон вмісту вологи та водної активності ядер у результаті сушіння може підвищити гідролітичну або окислювальну активність ферментів, включаючи ліпазу, пероксидазу та поліфенолоксидазу. Таким чином, процес сушіння слід ретельно застосовувати до шкаралупи горіха після збору врожаю, щоб не тільки придушити ріст мікробів, але й затримати погіршення якості, яке пов'язане з окисленням ліпідів у ядрах [6].

У відповідь на зміни світла та тепла молекули ліпідів вивільняються з утворенням вільних жирних кислот, що може вплинути на стабільність горіхової олії [10]. Світло є основним фактором для контролю фотоокислення, хоча його значення зменшується, якщо температура підвищується. Вплив концентрації кисню на окислення олії був більш значимим при підвищенні температури та під впливом світла [11]. Тому важливо підтримувати стабільність олії в процесі сушіння горіха. Крім того, швидка післязбиральна обробка горіха, зокрема сушіння, є важливим параметром з огляду якості кінцевого продукту на етапі зберігання. Загалом, щоб забезпечити тривалий термін зберігання та захистити їх від процесів, які призводять до гіркоти, горіх необхідно сушити одразу після збирання [12]. На жаль, у



порівнянні з іншими харчовими продуктами дослідження сушіння горіха обмежені [13]. Тому необхідно розробити та змодельовати систему сушіння горіха для забезпечення високої якості.

### 3. Мета досліджень

Метою проведення досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічної схеми конвективної сушарки волоських горіхів і проведення симуляції технологічного процесу сушіння.

### 4. Матеріали і методи досліджень

Встановленими технологічними вимогами до сушіння волоських горіхів є:

- забезпечення найшвидшого сушіння із безпечною температурою повітряного потоку (до 60 °C);
- забезпечення найбільшої рівномірності відведення вологи по всій масі горіхів;
- забезпечення найменших питомих енерговитрат;
- зменшення травмування плодів волоських горіхів для подальшого тривалого зберігання.

Враховуючи зазначені вимоги розроблена конструктивно-технологічна схема конвективної сушарки волоських горіхів із вертикальним гвинтовим робочим органом (рис. 1). Конвективна сушарка містить сушильну камеру для горіхів, який жорстко розміщений на рамі. Дно сушильної камери виконане у вигляді усіченого конуса і являє собою сітку з діаметром отворів 15 мм. Під сіткою розміщена повітряна камера, у яку через патрубок подається тепле повітря. У нижній частині сушильної камери через повітряну камеру проходить вивантажувальний патрубок із заслінкою. Зверху і знизу сушильної камери по середині розміщені підшипникові вузли, в яких встановлений гвинтовий робочий орган. Верхня частина гвинтового робочого органу приєднана до мотор-редуктора. В нижній частині гвинтового робочого органу в повітряній камері встановлено розподільник повітря конусоподібної форми.



*Рис. 1. Конструктивно-технологічна схема конвективної сушарки волоських горіхів*

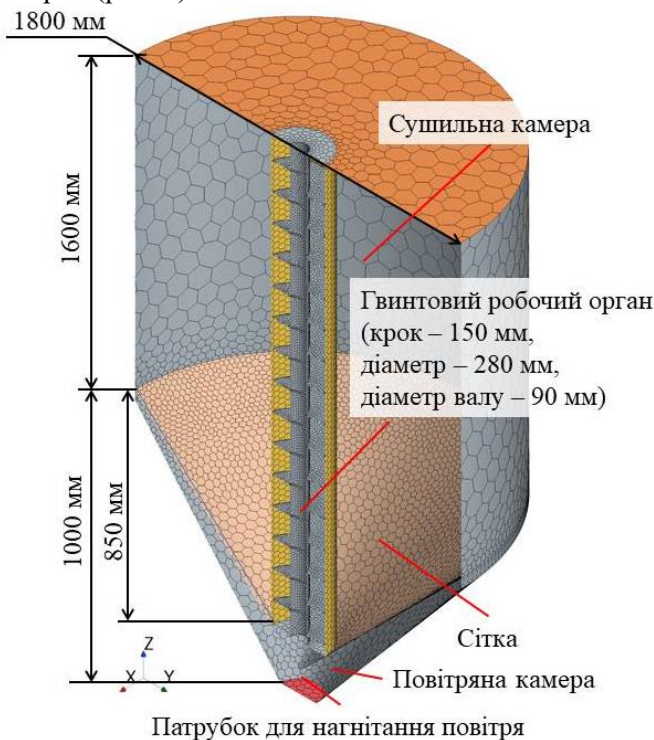
Конвективна сушарка волоських горіхів працює таким чином. Волоські горіхи засипаються у сушильну камеру через отвір у верхній частині. Далі потік теплого повітря подається до повітряної камери через відповідний патрубок і проходить крізь сітку до суміші горіхів. Для забезпечення рівномірності сушіння усього об'єму волоських горіхів приводять у дію гвинтовий робочий орган. При цьому горіхи, які знаходяться внизу сушильної камери піднімаються вгору виконуючи процес перерозподілу (перемішування) шарів суміші. Відкритий гвинтовий робочий орган зменшує фізичний вплив на волоські горіхи і відповідно зменшує їх травмування.

З метою оцінювання працездатності представленої конструктивно-технологічної схеми конвективної сушарки волоських горіхів проведемо симуляцію процесу сушіння в програмному пакеті Star CCM+. Для цього створена 3D-модель сушильної камери конвективної сушарки із гвинтовим робочим органом, який може обертатися навколо власної осі. Базуючись на обраних моделях сітки, а





саме генератор поверхневої сітки і генератор багатограничних комірок, встановленого опорного значення лінійного розміру 0,001 м, проведено генерацію об'ємної сітки сушильної камери конвективної сушарки (рис. 2).

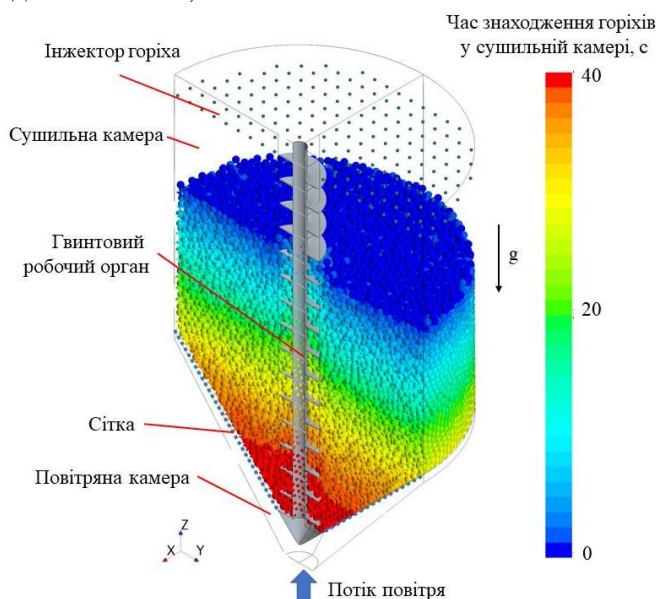


**Рис. 2. Об'ємна сітка сушильної камери конвективної сушарки і гвинтового робочого органу**

дотичний коефіцієнт відновлення – 0,45; коефіцієнт опору кочення – 0,25.

За геометричні розміри горіхів прийняті такі характеристики: середнє значення ефективного діаметра –  $D = 0,030$  м; мінімальне значення ефективного діаметра –  $D_{\min} = 0,022$  м; максимальне значення ефективного діаметра –  $D_{\max} = 0,038$  м; стандартне відхилення –  $\sigma_D = 0,01$  м. Розподіл розміру горіхів підпорядковується нормальному розподілу Гауса.

Взаємодія між горіхами підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Міндліна [15]: коефіцієнт тертя спокою – 0,51; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,45; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,45.



**Рис. 3. Схема симуляції сушіння волоських горіхів**

Наступним етапом симуляції є вибір фізичних моделей: тривимірна модель, нестационарна неявна модель, математична модель однокомпонентного газу (повітря), модель ідеального газу (повітря), модель турбулентної течії повітря, k-ε модель турбулентності повітря, ізотермічне рівняння енергії рідини, усереднене по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, роздільна течія, методи градієнта і границь, Лагранжева модель багатозафазного середовища, модель багатозафазної взаємодії, модель дискретних елементів (DEM), поле сили тяжіння [14].

Плоди волоських горіхів були представлені у вигляді Лагранжевої фази відповідно до таких моделей: постійної щільності, сили градієнта тиску, сили опору частинок, сферичних частинок, однокомпонентних твердих частинок, частинок DEM.

Горіхи мали такі фізико-механічні властивості: коефіцієнт Пуассона – 0,25; модуль Юнга – 0,3 МПа; щільність – 600 кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт тертя спокою – 0,51; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,45;

За властивості середовища були прийняті такі параметри: середовище – повітря; динамічна в'язкість –  $1,85508 \cdot 10^{-5}$  Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с<sup>2</sup>; тиск – 101325 Па. Температура вхідного потоку повітря – 60 °С, температура навколишнього середовища – 20 °С.

Схема симуляції моделювання процесу сушіння волоських горіхів наведена на рис. 3. Завантаження волоських горіхів здійснюється у верхній частині сушильної камери на основі функції інжектування Лагранжевої фази із такими параметрами: ймовірність появи горіхів – 0,7, початкова швидкість насінин – 0 м/с, завантаження горіхів  $Q = 100$  шт/с (це значення підібрано з умови забезпечення постійного рівня горіхів у сушильній камері).



Гвинтовий робочий орган обертався навколо власної осі із частотою 60 об/хв.

Швидкість потоку теплого повітря складала 8,84 м/с, що відповідає об'ємній швидкості 1000 м<sup>3</sup>/год.

Граничні умови для симуляції такі. Взаємодія між плодами волоських горіхів і стінками конвективної сушарки підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Міндліна: коефіцієнт тертя спокою – 0,51; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,45; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,45. Поверхня сітки є не прозорою для горіхів і прозорою для потоку повітря.

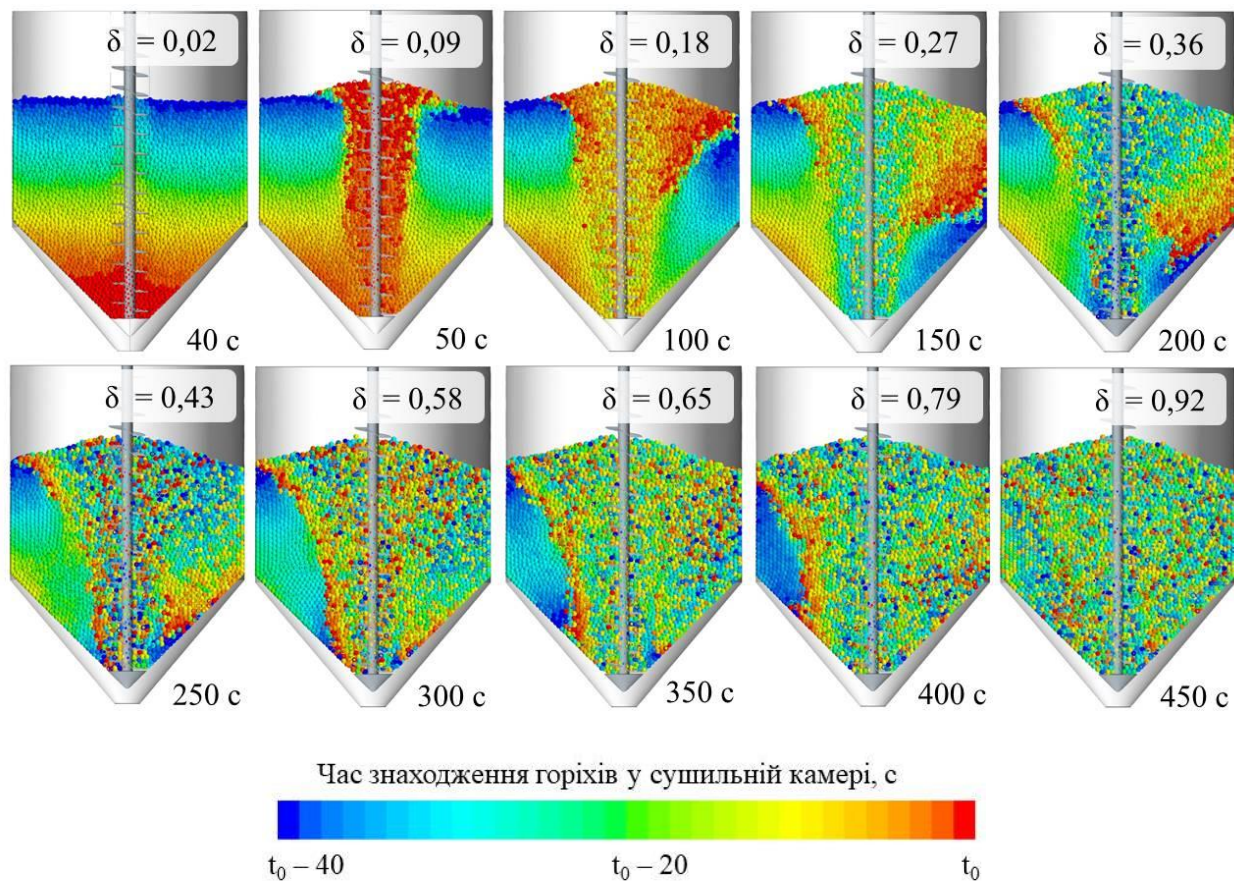
Загальний час симуляції – 600 с. Кількість ітерацій – 10. Крок за часом симуляції – 0,01 с.

### 5. Виклад основного матеріалу

За результатами симуляції отримана візуалізація процесу перерозподілу (перемішування) плодів волоських горіхів у сушильній камері конвективної сушарки під дією гвинтового робочого органу (рис. 4). Якість перемішування визначалася за коефіцієнтом варіації:

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

де  $\bar{C}$  – середня концентрація матеріалу у сушильній камері;  $C_i$  – концентрація матеріалу в  $i$ -ій зоні сушильної камери;  $n$  – кількість зон у сушильній камері.



**Рис. 4. Візуалізація процесу перерозподілу (перемішування) плодів волоських горіхів у сушильній камері під дією гвинтового робочого органу**

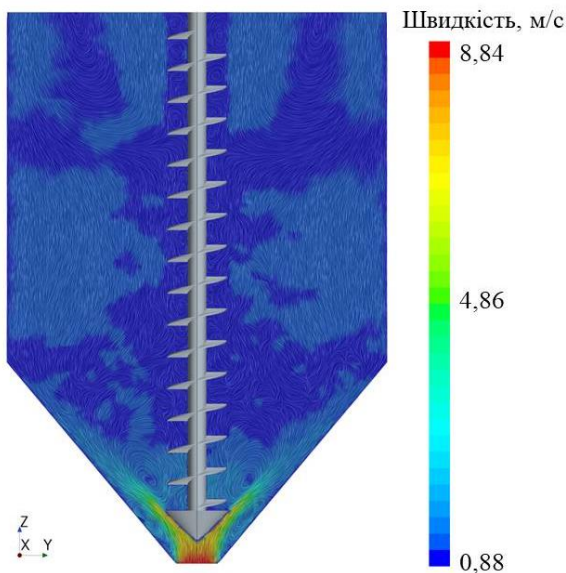
Аналіз візуалізації процесу перерозподілу і розрахованих коефіцієнтів варіації показав, що якість перемішування покращується з часом. При досягненні 432 с коефіцієнт варіації є найбільшим  $\delta = 0,92 \pm 0,02$  і далі стабілізується на цьому рівні. Тобто за час 432 с – 40 с виконується одне повне перемішування завантажених волоських горіхів у конвективній сушарці.

За результатами симуляції отримано розподіл швидкості потоку повітря у сушильній камері



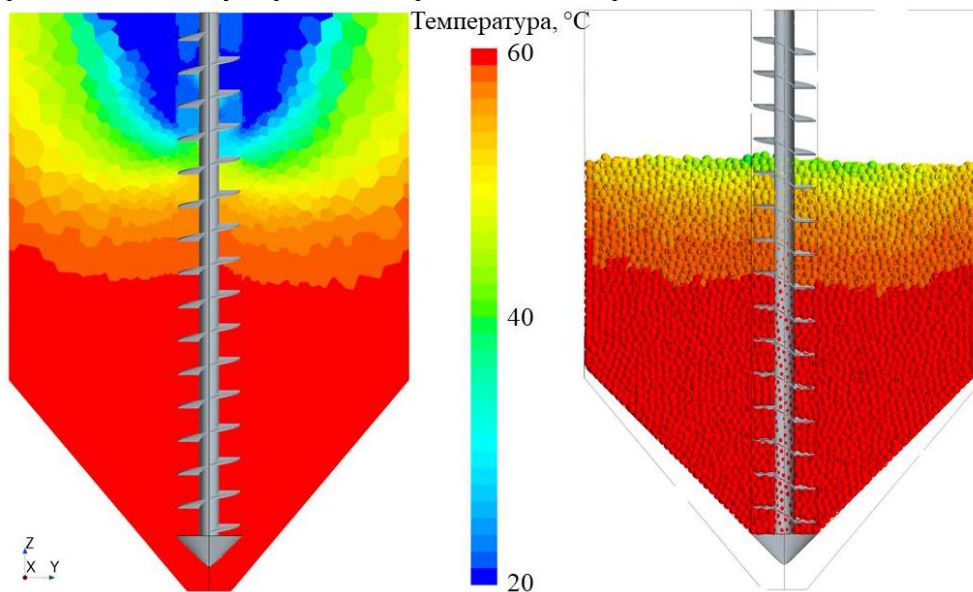
конвективної сушарки, який представлено на рис. 5.

Найбільша швидкість повітря фіксується на вході у повітряну камеру і складає 8,84 м/с. Далі потік повітря рівномірно розподіляється у повітряній камері і проходить через сітку та завантаженні у сушильну камеру плоди волоських горіхів. У завантажених плодах волоських горіхів рух повітряного потоку є турбулентним з найменшою абсолютною швидкістю 0,88 м/с.



**Рис. 5. Розподіл швидкості потоку повітря у сушильній камері конвективної сушарки**

За результатами симуляції отримано розподіл температури потоку повітря і плодів горіхів у сушильній камері конвективної сушарки, який представлено на рис. 6.



**Рис. 6. Розподіл температури потоку повітря і плодів волоських горіхів у сушильній камері конвективної сушарки**

З рисунку видно, що найбільша температура спостерігається у нижній частині сушарки, яка становить  $58 \pm 2$  °C. Далі спостерігається градієнт температури в бік зниження. У верхній частині сушильної камери температура становить  $43 \pm 2$  °C. Враховуючи досить швидке перемішування (392 с) горіхи з нижніх «тепліх» шарів переміщуються у верхні «холодні». Таким чином спостерігається явище тепломасопереносу.



## 6. Висновки

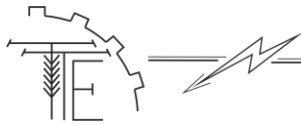
1. За результатами досліджень розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему конвективної сушарки волоських горіхів, яка виконана у вигляді змішувача із вертикальним гвинтовим робочим органом з нижнім нагнітанням потоку теплого повітря.

2. З використанням програмного пакету Star CSM+ проведено симуляцію технологічного процесу сушіння у розробленій конвективній сушарці. Отримано візуалізацію процесу перерозподілу (перемішування) плодів волоських горіхів у сушильній камері під дією гвинтового робочого органу і розподілу швидкості потоку повітря та температури у сушильній камері конвективної сушарки. За коефіцієнтом варіації встановлено, що якість перемішування є найкращою ( $\delta = 0,92 \pm 0,02$ ) і залишається на цьому рівні через 392 с з моменту початку обертання гвинтового робочого органу. Встановлено, що в робочій зоні сушарки спостерігається градієнт температури: в нижній частині температура складає  $58 \pm 2$  °C, у верхній –  $43 \pm 2$  °C. Враховуючи досить швидке перемішування (392 с) така різниця температур є не критичною.

3. Для більш детального обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів розробленої конвективної сушарки волоських горіхів необхідно провести повноцінне чисельне моделювання. За фактори досліджень пропонується обрати: кут конусоподібної сітки, об'єм сушильної камери, діаметр, крок і швидкість обертання гвинтового робочого органу, швидкість і температуру вхідного потоку повітря. За критерії оцінювання варто обрати коефіцієнт варіації перерозподілу шарів горіхів, їх середню температуру, найменшу швидкість потоку повітря в завантаженому об'ємі волоських горіхів.

## Список використаних джерел

1. 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.
2. 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.
3. Chen C. Characteristics and mechanisms of walnut drying under hot air and infrared heating. Dissertation doctor of philosophy in biological systems engineering. *University of California*. Davis. 2020. 282 p.
4. Kaveh M., Gilandeh Y.A., Chayjan R.A., Taghinezhad E., Mohammadigol R. Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 54. P. 1879–1899. DOI: 10.1007/s00231-018-2287-5
5. Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O. A., Yaropud V. M. Research of rational modes of drying rape seed *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58, № 2. P. 303–310.
6. 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 Sci Technol.* 2018. Vol. 90. P. 526–534. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.01.002
7. Paziuk V. M., Liubin M. V., Yaropud V. M., Tokarchuk O. A., Tokarchuk D. M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying, *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56, № 3. P. 39–48.
8. Kaveh M., Gilandeh Y.A., Chayjan R.A., Taghinezhad E. Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 54. P. 1879–1899. DOI: 10.1007/s00231-018-2287-5
9. Janowicz M., Lenart A. The impact of high pressure and drying processing on internal structure and quality of fruit. *Eur Food Res Technol.* 2018. Vol. 244. P. 1329–1340. DOI: 10.1007/s00217-018-3047-y
10. Fu M., Qu Q., Yang X., Zhang X. Effect of intermittent oven drying on lipid oxidation, fatty acids composition and antioxidant activities of walnut. *LWT Food Sci Technol.* 2016. Vol. 65. P. 1126–1132. DOI: 10.1016/2015.10.002
11. Rabadan A., Alvarez-Orti M., Pardo J. E., Alvarruiz A. Storage stability and composition changes of three cold-pressed nut oils under refrigeration and room temperature conditions. *Food Chem.* 2018. Vol. 259. P. 31–35. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.03.098
12. Ghirardello D., Contessa C., Valentini N., Zeppa G., Rolle R., Gerbi V., Botta R. Effect of storage condition on chemical and physical characteristics of hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Postharvest Biol Technol.* 2013. № 81. P. 37–43. DOI: 10.1016/2013.02.014
13. Turan A., Islam A. Effect of drying methods on some chemical characteristics of hazelnuts (*Corylus avellana* L.) during storage. *University Journal of the Institute of Science and Technology*. 2018. Vol. 8, Issue 3. 11–19. DOI: 10.21597/jist.458541
14. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. Modeling of mechanical



and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54. №. 1. P. 95–104.

15. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynoldce stress models. *Doctoral thesis*. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 2000. 124 p.

### References

- [1]. Kaletnik, H.M., Tsurkan, O.V. (2021). Osoblyvosti konstruktsiyi vibratsiynoho obladnannya dlya sushinnya vysokovolohoyi nasinnyevoyi syrovyny [Design features of vibrating equipment for drying high-moist seed raw materials]. *Vibrations in engineering and technology*, 1 (100). 5–13. [in Ukrainian].
- [2]. Wongso, I. (2021). Drying and quality characteristics of almonds and walnuts with different drying conditions. *Thesis master of science in biological systems engineering*. University of California. Davis. 112. [in English].
- [3]. Chen, C. (2020). Characteristics and mechanisms of walnut drying under hot air and infrared heating. Dissertation doctor of philosophy in biological systems engineering. University of California. Davis. 282. [in English].
- [4]. Kaveh, M., Gilandeh, Y.A., Chayjan, R.A., Taghinezhad, E., Mohammadigol, R. (2018). Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat Mass Transf*, 54. 1879–1899. DOI: 10.1007/s00231-018-2287-5 [in English].
- [5]. Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., Tokarchuk, O.A., Yaropud, V.M. (2019). Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 58 (2). 303–310. [in English].
- [6]. Wang, W., Jung, J., Mc Gorrin, 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 Sci Technol*, 90. 526–534. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.01.002 [in English].
- [7]. Paziuk, V.M., Liubin, M.V., Yaropud, V.M., Tokarchuk, O.A., Tokarchuk, D.M. (2018). Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 56 (3). 39–48. [in English].
- [8]. Kaveh, M., Gilandeh, Y.A., Chayjan, R.A., Taghinezhad, E. (2018). Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat Mass Transf*, 54. 1879–1899. DOI: 10.1007/s00231-018-2287-5 [in English].
- [9]. Janowicz, M., Lenart, A. (2018). The impact of high pressure and drying processing on internal structure and quality of fruit. *Eur Food Res Technol*, 244. 1329–1340. DOI: 10.1007/s00217-018-3047-y [in English].
- [10]. Fu, M., Qu, Q., Yang, X., Zhang, X. (2016). Effect of intermittent oven drying on lipid oxidation, fatty acids composition and antioxidant activities of walnut. *LWT Food Sci Technol*, 65. 1126–1132. DOI: 10.1016/2015.10.002 [in English].
- [11]. Rabadan, A., Alvarez-Orti, M., Pardo, J. E., Alvarruiz, A. (2018). Storage stability and composition changes of three cold-pressed nut oils under refrigeration and room temperature conditions. *Food Chem*, 259. 31–35. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.03.098 [in English].
- [12]. Ghirardello, D., Contessa, C., Valentini, N., Zeppa, G., Rolle, R., Gerbi, V., Botta, R. (2013). Effect of storage condition on chemical and physical characteristics of hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Postharvest Biol Technol*, 81. 37–43. DOI: 10.1016/2013.02.014 [in English].
- [13]. Turan, A., Islam, A. (2018). Effect of drying methods on some chemical characteristics of hazelnuts (*Corylus avellana* L.) during storage. *University Journal of the Institute of Science and Technology*, 8 (3). 11–19. DOI: 10.21597/jist.458541 [in English].
- [14]. Aliev, E.B., Bandura, V.M., Pryshliak, V.M., Yaropud, V.M., Trukhanska, O.O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1). 95–104. [in English].
- [15]. Wallin, S. (2000). Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynoldce stress models. *Doctoral thesis*. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 124. [in English].

### SIMULATION OF THE DRYING PROCESS OF WALNUTS IN A CONVECTION DRYER

Walnuts are valued in the world for the nutritional and medicinal properties of the fruits and the versatile character of their use. In particular, they are widely used in confectionery, oil and fat, flour milling, pharmaceutical, chemical, fodder, paint and other industries. To ensure the safety of the walnut crop, it is necessary to condition them. Moisture requirements for whole walnuts are not higher than 10%. Moisture content of whole nuts after harvesting can reach 35-45%. Therefore, it is necessary to carry out drying to





bring them to condition. Drying of whole nuts in Ukraine is usually carried out under natural conditions in covered, ventilated rooms. This is due to the fact that it is physically difficult to significantly speed up the process of drying whole nuts with the help of special equipment. In addition, it is economically inefficient, as it requires significant expenditure on energy carriers. However, if the volume of walnuts is significant, it is difficult to do without special drying equipment. Therefore, some enterprises apply forced drying of whole nuts with the help of various drying chambers in order to prevent their spoilage.

The purpose of the research is to justify the structural and technological scheme of a convective dryer for walnuts and carry out a simulation of the technological process of drying.

Based on the results of the research, the structural and technological scheme of the convective dryer for walnuts, which is made in the form of a mixer with a vertical screw working body with a lower flow of warm air, has been developed and substantiated.

Using the Star CCM+ software package, the technological process of drying was simulated in the developed convective dryer. A visualization of the process of redistribution (mixing) of walnut fruits in the drying chamber under the action of the screw working body and the distribution of air flow speed and temperature in the drying chamber of the convective dryer was obtained. According to the coefficient of variation, it was established that the quality of mixing is the best ( $\delta = 0.92 \pm 0.02$ ) and remains at this level after 392 s from the moment of the start of rotation of the screw working body. It was established that there is a temperature gradient in the working area of the dryer: the temperature in the lower part is  $58 \pm 2$  °C, in the upper part -  $43 \pm 2$  °C. Given the rather fast mixing (392 s), such a temperature difference is not critical.

For a more detailed substantiation of the structural and technological parameters of the developed convective walnut dryer, it is necessary to carry out a full-fledged numerical simulation. It is proposed to choose the following research factors: the angle of the cone-shaped grid, the volume of the drying chamber, the diameter, the step and speed of rotation of the screw working body, the speed and temperature of the incoming air flow. The evaluation criteria should be the coefficient of variation of the redistribution of walnut layers, their average temperature, and the lowest air flow rate in the loaded volume of walnuts.

**Key words:** process, parameters, research, drying, walnut, convection, dryer.

**F. 1. Fig. 6. Ref. 15.**

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Яропуд Віталій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

**Шаргородський Сергій Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2125-773X>).

**Луц Павло Михайлович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

**Лавренюк Петро Петрович** – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: lavreniuk.petro.1239@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2480-7365>).

**Vitalii Yaropud** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

**Serhiy Shargorodskiy** – PhD, Associate Professor of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2125-773X>).

**Pavlo Luts** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Agricultural Engineering and Technical Service of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

**Petro Lavreniuk** – postgraduate student of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: lavreniuk.petro.1239@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2480-7365>).