

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-65>

УДК 631.363.6:633.854.78:66.047.3

**СТАДНІК МИКОЛА**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4264-8054>

e-mail: [stadnik1948@gmail.com](mailto:stadnik1948@gmail.com)

**ЛУЦ ПАВЛО**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>

e-mail: [lutspm@gmail.com](mailto:lutspm@gmail.com)

**РУТКЕВИЧ ВОЛОДИМИР**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6366-7772>

e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)

**КОНДУСЬ ВЛАДИСЛАВ**

Сумський державний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3116-7455>

e-mail: [v.kondus@pvm.sumdu.edu.ua](mailto:v.kondus@pvm.sumdu.edu.ua)

## АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ ТА ЧАСТИН РОСЛИННОЇ МАСИ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРІЇ МАТЕРІАЛУ

*У статті досліджено кінетику сушіння вегетативних частин рослинних матеріалів різної форми з метою визначення часу сушіння та експозиції процесу для оптимізації післязбиральної обробки. Розглянуто особливості переносу вологи у матеріалах складної будови та неможливість точного врахування всіх факторів масо- та теплопереносу. Запропоновано використання спрощених аналітичних моделей, що базуються на рівняннях масопровідності для тіл класичної геометричної форми (пластина, циліндр, куля) з граничними умовами третього роду. Для волоських горіхів наведено кінетичні залежності сушіння при конвективному та інфрачервоному методах, що демонструють вплив температури, вологості та фізичної форми на швидкість процесу. Отримані спрощені аналітичні формули дозволяють визначати зміну вологовмісту матеріалу за часом та розраховувати експозицію сушіння для частин рослин різної форми, забезпечуючи науково обґрунтовану основу для оптимізації режимів сушіння та підвищення якості кінцевої продукції.*

**Ключові слова:** волоські горіхи, вологість, сушильний агент, сушильна камера, швидкість теплоносія, температура, вентилятор, енергоефективність.

**STADNIK MYKOLA, LUTS PAVLO, RUTKEVYCH VOLODYMYR**

Vinnitsia National Agrarian University

**KONDUS VLADYSLAV**

Sumy State University

## ANALYTICAL MODELS OF DRYING KINETICS OF WALNUTS AND PARTS OF PLANT MASS TAKING INTO ACCOUNT THE GEOMETRY OF THE MATERIAL

*The article investigates the kinetics of drying of vegetative parts of plant materials of various shapes in order to determine the drying time and exposure of the process for optimizing post-harvest processing. The peculiarities of moisture transport in materials of complex structure and the impossibility of accurately taking into account all mass and heat transfer factors are considered. Infrared drying allows you to reach the final moisture content faster, keeping the core from overheating. The use of simplified analytical models based on mass conductivity equations for bodies of classical geometric shape (plate, cylinder, sphere) with boundary conditions of the third kind is proposed. The use of the mass formation level for those classical forms, taking into account the boundary conditions of the third kind, allows for effective prediction of the mass transfer process in heterogeneous plant materials and influencing the drying rate of the physical form of a part of the material. The obtained formulas for calculating the drying time and changes in the moisture content of the material can be used to optimize the modes of convective, vacuum and infrared drying, which ensures energy savings and improved quality of the final product. For walnuts, kinetic dependences of drying by convective and infrared methods are given, demonstrating the influence of temperature, humidity and physical shape on the speed of the process. The obtained simplified analytical formulas allow determining the change in the moisture content of the material over time and calculating the drying exposure for plant parts of various shapes, providing a scientifically sound basis for optimizing drying modes and improving the quality of the final product.*

**Keywords:** walnuts, humidity, drying agent, drying chamber, coolant speed, temperature, fan, energy efficiency.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 28.05.2025

### Постановка проблеми

Сушіння рослинної сировини є одним із ключових етапів післязбиральної обробки, що визначає збереження поживних, технологічних та комерційних властивостей продукції. Особливо це стосується зелених кормових трав, насінневого вороху, лубоволокнистих культур та волоських горіхів, для яких правильний режим сушіння безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, тривалість його зберігання та економічну ефективність агропромислового виробництва [1, 2].

Процеси сушіння рослинної маси надзвичайно складні через неоднорідність структури матеріалу: різні форми і розміри частин (лист, стебло, бутон, насінина, ядро горіха) обумовлюють різну швидкість переміщення вологи та теплопередачі. Внутрішній масоперенос супроводжується дифузиею

води від центру частини до її поверхні, після чого волога віддається сушильному агенту, що створює складну взаємодію фізико-хімічних процесів. Точне врахування всіх факторів сушіння на практиці майже неможливе, оскільки для цього необхідно знати просторово-часові характеристики матеріалу та динаміку зміни температури і вологості [3].

Тому в наукових дослідженнях застосовують спрощені математичні моделі, що дозволяють адекватно описати кінетику сушіння. Зазвичай використовується аналогія між процесами масо- та теплопереносу, що дозволяє моделювати дифузію вологи у тілі матеріалу за допомогою рівнянь масопровідності та відповідних граничних умов. Однак розв'язки класичних рівнянь масопровідності для тіл стандартної геометричної форми (пластина, циліндр, куля) складні та включають нескінченні ряди, що обмежує їхнє практичне використання у розрахунках нестационарних процесів сушіння.

Актуальність проблеми визначається необхідністю розробки компактних аналітичних формул, що дозволяють визначати зміну вологовмісту рослинних матеріалів різної форми за часом та розраховувати експозицію сушіння. Такі спрощені моделі дозволяють не лише передбачати кінетику сушіння для конвективних, вакуумних та інфрачервоних сушарок, але й оптимізувати режими сушіння з урахуванням фізичної форми частин матеріалу, коефіцієнтів масопровідності та масообміну, а також умов зовнішнього середовища.

Отже, рішення задачі отримання аналітичних залежностей для кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів залишається важливим напрямом досліджень, оскільки забезпечує науково обгрунтовану основу для підвищення ефективності післязбиральної обробки та покращення якості готової продукції.

### Аналіз останніх джерел

У сучасних дослідженнях післязбиральної обробки рослинної сировини значна увага приділяється процесам сушіння, які визначають збереження якості продукції, її фізико-хімічні та органолептичні властивості, а також тривалість зберігання. Особливо актуальним є вивчення кінетики сушіння волоських горіхів та інших листостеблевих матеріалів, що мають неоднорідну морфологію, оскільки неоднорідність частин сировини (листя, стебла, бутони, насіння, ядра горіхів) суттєво впливає на швидкість масопереносу та теплопередачі [1, 4, 5].

Останні наукові дослідження показують, що для опису процесів сушіння ефективним є використання математичних моделей, що базуються на рівняннях масо- та теплопровідності [6]. Такі моделі дозволяють прогнозувати зміну вологості матеріалу за часом та визначати експозицію сушіння для різних геометричних форм частин сировини, включаючи пластини, циліндри та кулі. Особливо цінними є спрощені аналітичні залежності, які дозволяють враховувати вплив фізичних параметрів матеріалу та зовнішніх умов (температури, вологості, швидкості повітряного потоку) на кінетику процесу без необхідності чисельного інтегрування складних диференціальних рівнянь [7, 8].

Паралельно активно розвиваються технологічні аспекти сушіння [1, 9, 10]. Досліджуються різні способи сушіння, такі як конвективне, вакуумне, інфрачервоне та комбіновані методи, включаючи поєднання конвективного та вібраційного впливу. Результати свідчать, що сучасні технології дозволяють скоротити тривалість сушіння на 30–40 %, зберігаючи при цьому органолептичні та технологічні властивості продукту, а також забезпечують більш рівномірне висушування матеріалу різної форми.

Наукові дослідження також показують, що ефективність сушіння визначається не лише температурою і відносною вологістю сушильного агента, але й геометричною формою частин сировини, коефіцієнтами масопровідності та масообміну, а також початковим та кінцевим вологовмістом матеріалу. Виявлено, що точне врахування цих факторів дозволяє оптимізувати режими сушіння та підвищувати енергоефективність обладнання, що має важливе значення для промислового застосування [6].

Таким чином, останні дослідження у галузі кінетики сушіння рослинної сировини демонструють комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання процесів, експериментальне вивчення кінетики та розробку інноваційних технологічних рішень. Це дозволяє науково обгрунтовано прогнозувати динаміку зміни вологості матеріалу, оптимізувати режими сушіння різних рослинних культур, підвищувати якість кінцевої продукції та забезпечувати ефективне використання енергетичних ресурсів у післязбиральній обробці.

**Метою дослідження** є визначення кінетичних закономірностей сушіння вегетативних частин рослинних матеріалів різної геометричної форми (пластина, циліндр, куля) та волоських горіхів у шаркрупі на основі компактних аналітичних формул. Дослідження передбачає розробку спрощених математичних моделей масопереносу, які дозволяють прогнозувати зміну вологовмісту матеріалу та волоських горіхів за часом, визначати експозицію сушіння і оцінювати вплив фізико-хімічних і технологічних параметрів на швидкість висушування. Особлива увага приділяється застосуванню цих моделей до різних методів сушіння (конвективного, вакуумного, інфрачервоного), що забезпечує науково обгрунтовану оптимізацію режимів сушіння волоських горіхів, підвищення якості готової продукції та економію енергетичних ресурсів.

### Виклад основного матеріалу

Сушіння волоських горіхів є ключовим етапом післязбиральної обробки, що визначає збереження якості ядра, тривалість зберігання та комерційну цінність продукції [2, 10-14]. Процес сушіння включає дві основні фази. Перша – фаза постійної швидкості, характерна для початкового етапу, коли поверхня горіха ще вкрита вологою і відбувається інтенсивне випаровування. Швидкість сушіння в цей період залишається практично сталою. Друга – фаза зменшення швидкості сушіння – починається після значного випаровування поверхневої вологи. Волога мігрує із внутрішніх шарів ядра до поверхні, і швидкість сушіння поступово зменшується, що визначає основну частину тривалості процесу [7, 8, 13].

Початкова вологість горіхів зазвичай становить 45 %, кінцева вологість для зберігання – 8 % для ядра та 10% для горіхів у шкарлупі. При конвективному сушінні використовують температуру 45–55 °C і швидкість повітря 2 м/с, тоді як у вакуумних та інфрачервоних сушарках можна застосовувати нижчі температури для збереження органолептичних властивостей.

Кінетику сушіння волоських горіхів можна описати експоненційною моделлю [7, 13]:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k \cdot t^n), \quad (1)$$

де  $M$  – поточна вологість горіха (%),  $M_0$  – початкова вологість (%),  $M_e$  – рівноважна вологість (%),  $k$  – константа швидкості сушіння,  $n$  – емпіричний показник, що враховує форму та неоднорідність горіхів,  $t$  – час сушіння (год). Для волоських горіхів у шкарлупі при конвективному сушінні  $k \approx 0,15 \text{ год}^{-1}$ ,  $n=1$ , а при інфрачервоному сушінні  $k \approx 0,25 \text{ год}^{-1}$ .

На рисунку 1 наведено зміну вологості волоських горіхів у часі при конвективному та інфрачервоному сушінні [12].

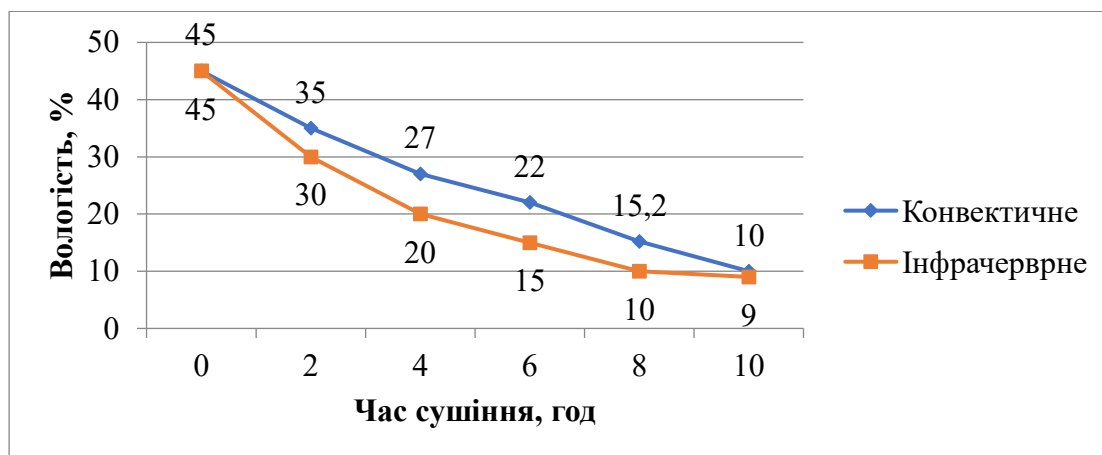


Рис. 1. Кінетики сушіння волоських горіхів

З наведеного графіка рис. 1 видно, що інфрачервоне сушіння дозволяє швидше досягти кінцевої вологості, зберігаючи ядро від перегріву. На ефективність процесу значно впливають температура, відносна вологість повітря та швидкість його потоку, а також фізична форма горіхів. Горіхи у шкарлупі сушаться повільніше через обмежену дифузію вологи, тоді як очищене ядро висихає швидше.

Практичне застосування цих даних дозволяє оптимізувати режими сушіння у конвективних, вакуумних та інфрачервоних сушарках, що забезпечує високу якість готової продукції та економію енергії.

Рослинні сільськогосподарські матеріали: подрібнена кормова трава, насіннєвий ворох, лубоволокнисті культури, які консервуються для зберігання шляхом конвективного сушіння мають неоднорідний за формою (лист, стебло, бутон, насінина) склад в загальній масі сировини. Це зумовлює різну швидкість переміщення і віддачі вологи. Тому розглянемо процес масопереносу для тіл розподіл вологовмісту в якому визначається однією координатою (пластина – товщина, циліндр, куля – радіус).

Диференціальне рівняння масопродності (яким моделюється процес сушіння) для тіл класичної форми можна записати у вигляді [1, 6]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{2V+1}{x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right], 0 \leq x \leq R \quad (2)$$

де  $U$  – вологовміст матеріалу,  $a_m$  – коефіцієнт масопровідності,  $x$  – просторова координата,  $\tau$  – час,  $V$  – коефіцієнт форми (пластина  $V=-0.5$ ; циліндр  $V=0$ ; куля  $V=0,5$ ),  $R$  – розмір (пластина половина товщини, куля, циліндр радіус).

При граничних умовах третього ряду (задається закон масообміну і параметри навколишнього середовища і поверхні, які характеризуються величиною рівноважного вологовмісту, як функцією

$U_0 = f(t, \varphi)$  температури  $t$  та вологовміст повітря  $\varphi$  поле концентрації вологи визначається розв'язком рівняння (2) при граничних умовах (3):

$$-a_m \left( \frac{\partial U}{\partial U} \right) n = \beta(U - U_p(t, \varphi)) \quad (3)$$

Для тіл різної форми геометричної форми С.В. Ликовим отримані наступні рівняння у вигляді нескінченних рядів які швидко сходяться [1, 6]:

– для пластини:

$$U = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \mu_i \cos(\mu_i \frac{X}{R})}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} e^{-\mu_i^2 Fom} \quad (4)$$

– для циліндра:

$$U = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{I_1 \mu_i I_0(\mu_i \frac{X}{R})}{\mu_1 + I_0 \mu_1 I_1^2 \mu_0} e^{-\mu_i^2 Fom} \quad (5)$$

– для кулі:

$$U = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i \frac{X}{R}}{\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1 \frac{X}{R}} e^{-\mu_i^2 Fom} \quad (6)$$

де  $Fom = \frac{Om}{R^2}$  – масообмінний критерій Фур'є,  $U = \frac{U-U_p}{U_0-U_p}$  – відносний вологовміст.

При сушінні матеріалів повне висушування (до рівноважної вологості) досягається при  $x = 0$ , тобто коли рівноважна вологість досягається, центр частинки матеріалу, тоді рівняння (4) - (6) набувають вигляду:

– для пластини:

$$U = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \mu_i e^{-\mu_i^2 Fom}}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \quad (7)$$

– для циліндра:

$$U = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \mu_i e^{-\mu_i^2 Fom}}{\mu_1 + [I_0^2(\mu_1) + I_1^2(\mu_0)]} \quad (8)$$

– для кулі:

$$U = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i}{\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1} e^{-\mu_i^2 Fom} \quad (9)$$

$$tg \mu = \frac{1}{\beta_{im}} \mu$$

де  $\mu_1$  – корені характеристичного рівняння;  $\beta_{im}$  – критерій;  $I_0(\mu)$ ,  $I_1(\mu)$  – функції Бесселя першого ряду, нульового і першого порядків. Значення коренів наведені в [1].  $\beta_{im} = \beta R/a_m$

Таким чином, рівняння (7) – (9) можна узагальнити залежністю:

$$U = f(F_0, \beta_i) \quad (10)$$

При аналізі числових значень параметрів у функції (10) в роботі [6] встановлено, що залежність між величинами  $U$ ,  $\beta_i$ ,  $Fom$  для тіл геометричної форми може бути подана у вигляді:

$$F_0 = -K2,3 \ln U + n \quad (11)$$

де  $K = \frac{c}{\beta_1} + d$ ,  $n$ ,  $c$ ,  $d$  – числові коефіцієнти, які для різної форми матеріалу мають такі значення:

– пластина:  $n=0,12$ ;  $c=2,3$ ;  $d=0,8$ ,

– циліндр:  $n=0,06$ ;  $c=1,15$ ;

$d=0,4$ ,

– куля:  $n=0,04$ ;  $c=0,767$ ;

$d=0,27$ .

Розкриваючи значення параметрів у формулі (11) матимемо:

– для пластини:

$$\tau = -\frac{R^2}{a_m} \left[ \frac{2,3}{\beta_{im}} + 0,8 \right] \ln \frac{U_k - U_p}{U_0 - U_p} 2,3 + 0,12 \quad (12)$$

– для циліндра:

$$\tau = -\frac{R^2}{a_m} \left[ \frac{1,15}{\beta_{im}} + 0,4 \right] 2,3 \ln \frac{U_k - U_p}{U_0 - U_p} 2,3 + 0,06 \quad (13)$$

– для кулі:

$$\tau = -\frac{R^2}{a_m} \left[ \frac{0,767}{\beta_{im}} + 0,27 \right] 2,3 \ln \frac{U_k - U_p}{U_0 - U_p} 2,3 \quad (14)$$

де  $U_0$  – початковий вологовміст матеріалу;  $U_k$  – кінцевий вологовміст.

Рівняння (12) – (14) визначають експозицію сушіння матеріалу різної геометричної форми від початкового до кінцевого значення вологовмісту.

З рівняння (11) можна отримати часову залежність, яка визначає кінетику сушіння:

$$U = \exp \left[ -\frac{1}{2.3k} \left( \frac{a_m}{R^2} \tau - n \right) \right] \quad (15)$$

або

$$U(t) = U_p + (U_0 - U_p) e^{\frac{n}{2.3k}} \exp \left( -\frac{a_m}{R^2 2.3k} \tau \right) \quad (16)$$

Таким чином, узагальнене рівняння (16) в залежності від значень коефіцієнтів  $k$  і  $n$  які входять до нього, визначають зміну вологовмісту матеріалу за часом для частин рослинних матеріалів різної форми.

### Висновки

Для волоських горіхів встановлено двофазний характер процесу сушіння: фаза постійної швидкості та фаза зменшення швидкості, що визначають тривалість сушіння та впливають на збереження якості ядра. Виявлено, що інфрачервоне сушіння забезпечує швидше досягнення кінцевої вологості при збереженні органолептичних властивостей.

Розроблено спрощені аналітичні моделі кінетики сушіння вегетативних частин рослинних матеріалів різної геометричної форми (пластина, циліндр, куля), що дозволяють описати зміну вологовмісту за часом і визначити експозицію сушіння.

Застосування рівнянь масопровідності для тіл класичної форми з урахуванням граничних умов третього роду дозволяє ефективно прогнозувати процес масопереносу в неоднорідних рослинних матеріалах та враховувати вплив фізичної форми частин матеріалу на швидкість сушіння.

Отримані формули для розрахунку часу висушування та зміни вологовмісту матеріалу можуть бути використані для оптимізації режимів конвективного, вакуумного та інфрачервоного сушіння, що забезпечує економію енергії та підвищення якості кінцевої продукції.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на врахування впливу температурної залежності коефіцієнтів масопровідності та інтеграцію моделей у комп'ютерні системи для прогнозування та автоматизації процесів сушіння сільськогосподарської сировини.

### Література

1. Мазур В. Г., Войтюк Д. Г., Соколенко В. М. Сучасні технології сушіння сільськогосподарської продукції: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 356 с.
2. Кухарець С. М., Савчук В. П., Кирилюк В. В. Технологія сушіння та зберігання горіхоплідних культур. Вісник аграрної науки. – 2021. – №9. С. 92–99.
3. Хижняк В. П., Марченко І. В. Основи масообміну і теплотехнічні процеси в агропромисловому виробництві: навч. посіб. Харків: ХНАУ, 2016. 412 с.
4. Калетнік Г. М., Цуркан О. В., Спірін А. В., Дідик А. М. Технологія переробки волоських горіхів. Вібрації в техніці та технологіях. 2024. №2 (113). С. 5–13. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-1.
5. Коваль В. М., Мельник С. О. Ефективність використання вібраційних сушарок у післязбиральній доробці горіхоплідних культур. Наукові праці Подільського державного аграрно-технічного університету. 2020. – Вип. 28(2). – С. 120 – 126.
6. Котов Б.І. Тепло- і масообмін при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів у щільному нерухомому шарі / Б.І.Котов, А.В. Спірін, Р.А.Калініченко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016 – №2 (94). С. 24 – 28.
7. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials / X.D. Chen // *Drying Technology*. – 2007. – 25 (8). P. 1203–1213. URL: <https://doi.org/10.1080/07373930701506660>.
8. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials / X.D. Chen // *Drying Technology*. – 2007. – 25 (7). P. 1203–1213. URL: <https://doi.org/10.1080/07373930701541757>
9. Траченко Л. М. Комбіновані методи сушіння рослинної сировини: сучасний стан та перспективи розвитку. Вісник НУБіП. Серія: Техніка і енергетика АПК. – 2021. – Вип. 25. С. 73–80.
10. Руткевич В.С. Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкарлупі / В.С. Руткевич, А.М. Дідик // 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>
11. 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
12. Цуркан О.В. Оцінка ефективності процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці / О.В. Цуркан, А.В. Спірін, В.С. Руткевич, А.М. Дідик // Вібрації в техніці та технологіях. – 2024. – № 3 (114). С. 5–12. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1
13. Man, X.; Li, L.; Fan, X.; Zhang, H.; Lan, H.; Tang, Y.; Zhang, Y. Drying Kinetics and Mass Transfer Characteristics of Walnut under Hot Air Drying. *Agriculture* 2024, 14, 182. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020182>
14. Цуркан О.В. Застосування геліопідігрівачів повітря для попереднього зневоложення

волооських горіхів / О.В. Цуркан, А.В. Спирін, В.С. Руткевич, А.М. Дідик // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.* – 2024. – № 6(1) (343). С. 424–428. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-343-6-63

### References

1. Mazur V. H., Voitiuk D. H., Sokolenko V. M. Suchasni tehnolohii sushinnia silskohospodarskoi produktsii: monohrafiia. Vinnytsia: VNAU, 2020. 356 s.
2. Kukharets S. M., Savchuk V. P., Kyryliuk V. V. Tekhnolohii sushinnia ta zberihannia horikhoplidnykh kultur. *Visnyk ahranoi nauky.* – 2021. – №9. S. 92–99.
3. Khyzhniak V. P., Marchenko I. V. Osnovy masoobminu i teplotekhnichni protsesy v ahropromyslovomu vyrobnytstvi: navch. posib. Kharkiv: KhNAU, 2016. 412 s.
4. Kaletnik H. M., Tsurkan O. V., Spirin A. V., Didyk A. M. Tekhnolohiiia pererobky voloskykh horikhiv. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* 2024. №2 (113). S. 5–13. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-1.
5. Koval V. M., Melnyk S. O. Efektyvnist vykorystannia vibratsiinykh susharok u pisliazybalnii dorobtsi horikhoplidnykh kultur. *Naukovi pratsi Podilskoho derzhavnogo ahrarno-tekhnichnoho universytetu.* 2020. – Vyp. 28(2). – S. 120–126.
6. Kotov B.I. Teplo- i masoobmin pry sushinni silskohospodarskykh roslynnykh materialiv u shchilnomu nerukhomomu shari / B.I.Kotov, A.V. Spirin, R.A.Kalinichenko // *Tekhnika, enerhetyka, transport APK.* – 2016 – №2 (94). S. 24 – 28.
7. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials / X.D. Chen // *Drying Technology.* – 2007. – 25 (8). P. 1203–1213. URL:<https://doi.org/10.1080/07373930701506660>.
8. Chen X.D. Moisture diffusivity in food and biological materials / X.D. Chen // *Drying Technology.* – 2007. – 25 (7). P. 1203–1213. URL: <https://doi.org/10.1080/07373930701541757>
9. Trachenko L. M. Kombinovani metody sushinnia roslynnoi syrovyny: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku. *Visnyk NUBiP. Serii: Tekhnika i enerhetyka APK.* – 2021. – Vyp. 25. S. 73–80.
10. Rutkevych V.S. Ohliad metodiv ta zasobiv dlia sushinnia voloskoho horikha v shkarlupi / V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky.* – 2023. – № 1 (317). С. 230–236. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>
11. Tsurkan O.V. Rozrobka konvektyvno-vibratsiinoi susharky dlia sushinnia voloskykh horikhiv / O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky.* – 2024. – № 2 (331). С. 393–399. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-61
12. Tsurkan O.V. Otsinka efektyvnosti protsesu sushinnia voloskykh horikhiv v konvektyvno-vibratsiinii sushartsii / O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – 2024. – № 3 (114). С. 5–12. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1
13. Man, X.; Li, L.; Fan, X.; Zhang, H.; Lan, H.; Tang, Y.; Zhang, Y. Drying Kinetics and Mass Transfer Characteristics of Walnut under Hot Air Drying. *Agriculture* 2024, 14, 182. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020182>
14. Tsurkan O.V. Zastosuvannia heliopedivachiv povitria dlia poperednoho znevolozhennia voloskykh horikhiv / O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Serii: tekhnichni nauky.* – 2024. – № 6(1) (343). С. 424–428. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-343-6-63