

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ДІДИК АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 631.365:66.047.45 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ

133 Галузеве машинобудування

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 А. М. ДІДИК

Науковий керівник:

Цуркан Олег Васильович,

доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Дідик А.М. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини для сушіння волоських горіхів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2025.

Розв’язано актуальне наукове завдання підвищення продуктивності, зменшення енерговитрат при нормативній якості готового продукту під час сушіння волоських горіхів шляхом розробки і обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини.

Висвітлено актуальність дослідження, визначено його мету та сформульовано основні завдання для досягнення поставлених цілей. Охарактеризовано наукову новизну роботи, її практичне значення, а також відзначено особистий внесок автора у виконанні дослідження. Наведено інформацію щодо апробації отриманих результатів, їх опублікування, а також представлено структуру та обсяг дисертації.

Досягнення мети даної роботи зведено до розв’язання таких науково-прикладних завдань: на основі аналізу існуючих засобів для сушіння волоських горіхів, а також результатів теоретичних та експериментальних досліджень розробити принципову схему вібраційної машини для сушіння волоських горіхів; розробити математичну модель нагрівання горіху в процесі сушіння залежно від початкових умов і технологічних параметрів процесу; розробити методику та провести дослідження по визначенню фізико-механічних та теплофізичних характеристик волоських горіхів, а також зміни інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла в процесі сушіння; розробити і виготовити промисловий зразок вібраційної машини для сушіння горіхів; експериментально підтвердити доцільність застосування вібраційного впливу в якості способу інтенсифікації процесу сушіння волоських горіхів; розробити методику та

провести експериментальні дослідження для встановлення раціональних параметрів роботи вібраційної машини; здійснити перевірку адекватності отриманої математичної моделі; здійснити виробничу апробацію дослідно-промислового зразка вібраційної машини для сушіння волоських горіхів та оцінити його економічну ефективність.

Здійснено мінімізацію енергетичних витрат за умови збереження якості волоських горіхів під час їх конвективного сушіння у вібраційній машині. Це було досягнуто шляхом обґрунтування конструктивної схеми а її технологічних параметрів. Розроблено математичну модель нагрівання волоського горіха, яка забезпечувала визначення температури його ядра залежно від початкового стану матеріалу, режимних параметрів та експозиції сушіння. Модель отримана на основі аналітичного розв'язання рівняння нестационарної теплопровідності для геометричної фігури «куля в сфері» з урахуванням негативних внутрішніх джерел тепла, інтенсивність яких змінювалася за експоненціальним законом.

Встановлено вплив температури, швидкості сушильного агента та віброприскорення робочої камери на енергетичну ефективність процесу сушіння та закономірності зміни сумарної й поточної інтенсивності внутрішніх джерел тепла в матеріалі. Визначено, що теплоємність, теплопровідність і температуропровідність волоських горіхів змінювалися відповідно до закономірностей, притаманних колоїдним капілярно-пористим рослинним матеріалам.

Результати досліджень можуть бути використані при проєктуванні та модернізації сушарок із вібраційною дією на сушильну камеру, що зменшує витрати енергії, збільшує продуктивність та енергоефективність процесу сушіння.

У першому розділі розглянуто стан та перспективи виробництва волоських горіхів в світі та Україні. Зазначено, що Україна входить у п'ятірку світових виробників волоських горіхів. Як недолік, відмічається той факт, що більше 80% вирощених горіхів реалізуються в цілому вигляді (в шкаралупі). Виробництво ядра горіха, а також використання інших частин горіху потребує переробки

врожаю волоських горіхів із підвищеною вологістю на промислових технологічних лініях, основною частиною яких є сушильне обладнання. Проведений аналіз зарубіжних та вітчизняних сушарок для післязбиральної обробки волоських горіхів. Радіаційні сушарки більш енергоємні і потребують високотехнологічних засобів автоматизації та високого рівня підготовки обслуговуючого персоналу. Для конвективних сушарок основною проблемою є заходи та засоби підвищення інтенсивності процесу сушіння. Запропонована гіпотеза, що вібраційний вплив на оброблюване середовище зменшує аеродинамічний опір шару волоських горіхів, за рахунок створення псевдозрідженого стану, що в свою чергу, збільшує коефіцієнт теплообміну та інтенсифікує процес сушіння. Сформовані мета, об'єкт, предмет та задачі досліджень.

У другому розділі розглянуті теоретичні засади процесу сушіння та можливі шляхи його інтенсифікації. В зв'язку з термолабільністю волоських горіхів не може бути застосований найбільш простий шлях – збільшення різниці температур між сушильним агентом і матеріалом. Для визначення максимально можливої температури сушильного агенту розроблена математична модель процесу сушіння, яка визначає температуру ядра горіху в довільний час залежності від початкових умов і технологічних параметрів. Для визначення закону зміни кількості енергії, що витрачається для випаровування вологи з матеріалу, використано поняття негативних внутрішніх джерел тепла, інтенсивність яких змінюється за експоненціальним законом. Наведені теоретичні основи визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів. Основою є використання закономірностей нестационарного нагріву двох напівобмежених стрижнів, у місці дотику яких розташовано джерело тепла постійної потужності.

У третьому розділі наведено програму і методику проведення експериментальних досліджень, опис експериментальної установки, прилади, що використовували в роботі.

Розроблені методики для визначення фізико-механічних характеристик волоських горіхів, зокрема, розмірно-вагові характеристики: еквівалентний

діаметр горіха, коефіцієнт сферичності, коефіцієнт пористості шару горіхів, щільність дійсна та насипна.

Розроблена методика, представлена схема та загальний вигляд установки для визначення теплофізичних характеристик матеріалу. Визначались три основні теплофізичні характеристики: теплоємність, теплопровідність та температуропровідність горіхів.

Розроблена методика визначення коефіцієнта теплообміну без вібраційного впливу та з урахуванням його. В якості факторів, які впливають на коефіцієнт теплообміну, вибрані температура і швидкість сушильного агенту, а також віброприскорення при фіксованій амплітуді коливань сушильної камери. Побудовані криві сушіння горіхів.

Інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла характеризується двома показниками: початковою інтенсивністю q_0 (в момент часу $\tau = 0$) і коефіцієнтом k_1 , який характеризує швидкість зміни інтенсивності. Представлені формули для визначення числових значень цих величин.

Розроблена план-матриця багатofакторного експерименту для визначення раціональних технологічних параметрів роботи вібраційної машини. У якості факторів були вибрані температура і швидкість сушильного агенту та віброприскорення сушильної камери при фіксованому значенні амплітуди її коливань 6,5 мм. Планування експерименту та обробка дослідних даних проводилась за допомогою програми *Mathematica 12.0*. В якості критерія оптимізації був вибраний основний показник ефективності роботи сушарки – затрати енергії на 1 кг випаруваної вологи.

В четвертому розділі приведено результати реалізації програми експериментальних досліджень.

Визначені розмірно-вагові характеристики горіхів сорту «Chandler». Особливу цікавість викликає такий показник як коефіцієнт сферичності. Для горіхів цього сорту він становить 91,08 %, що є досить високим значенням. Можна стверджувати, що допущення про сферичну форму горіха, яке було зроблено при створенні математичної моделі процесу сушіння, є прийнятним.

Були визначені залежності теплофізичних характеристик від вологості матеріалу. Характер цих залежностей є подібним до аналогічних залежностей інших рослинних матеріалів, тому що всі вони відносяться до колоїдних капілярно-пористих тіл.

Коефіцієнт теплообміну із застосуванням вібраційного впливу більший на 20...27 % ніж без застосування вібраційного впливу при однакових значеннях температури і швидкості сушильного агенту. Сформована гіпотеза, яка полягає в тому, що вібраційний вплив на оброблюване середовище зменшує аеродинамічний опір шару волоських горіхів, за рахунок створення псевдозрідженого стану, що в свою чергу, збільшує коефіцієнт теплообміну та інтенсифікує процес сушіння. Побудовані криві сушіння, характер яких підтверджує гіпотезу про позитивний вплив вібрації на енергетичні показники процесу сушіння.

В результаті експериментальних досліджень отримані формули для визначення основних показників, що характеризують інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла – початкової інтенсивності q_0 і коефіцієнта k_1 .

В результаті проведення дослідів по визначенню раціональних технологічних параметрів процесу сушіння отримано рівняння регресії та побудовані поверхні відгуку. Аналіз рівняння регресії дозволив визначити раціональні режимні параметри: температура сушильного агенту 38°C , його швидкість 22,5 м/с, віброприскорення сушильної камери $65,6 \text{ м/с}^2$ при постійній амплітуді її коливань 6,5 мм.

Верифікація математичної моделі показала розбіжність між теоретичними та експериментальними даними не більше 11 %, а проведена статистична оцінка свідчить про адекватність розробленої математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язані з обґрунтуванням конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини для сушіння волоських горіхів, упроваджені у навчально-методичну та наукову роботу кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК

Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисципліни «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв».

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» отримало технічну документацію на виготовлення дослідного зразка для подальшого промислового освоєння. Розроблений дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів пройшов виробничу перевірку на базі ПП «ЯФК ВІТОН». В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що за віброприскорення $A\omega^2 = 65,6 \text{ м/с}^2$, швидкості теплоносія $V = 22,5 \text{ м/с}$ та температури $t = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ забезпечувалось зниження вологості волоських горіхів з $W_p = 28 \text{ \%}$ до $W_k = 10 \text{ \%}$ протягом 8 годин при збереженні їх якісних показників. Додатково було визначено, що питомі енергетичні витрати становили $3,91 \text{ МДж/кг}$ випаруваної вологи, що виявилось на $15\text{--}17 \text{ \%}$ менше, ніж у сучасних промислових конвективних сушарках.

Виробнича перевірка засвідчила ефективність застосування вібраційного впливу для інтенсифікації процесу сушіння. Основний показник енергетичної ефективності роботи сушарки – затрати енергії на випаровування 1 кг вологи – становив $3,91 \text{ МДж/кг}$, що на $12\text{...}15 \text{ \%}$ менше ніж у сучасних конвективних сушарок сільськогосподарського призначення.

Результати техніко-економічної оцінки розробленого дослідно-промислового зразка вібраційної машини для сушіння волоських горіхів засвідчили його перевагу над базовою сушаркою і показують, що реалізація процесу сушіння за допомогою вібраційного впливу на шар горіхів інтенсифікує процес сушіння та значно зменшує енергозатрати на технологічний процес післязбиральної обробки волоських горіхів. Річний економічний ефект становить $184\,500 \text{ грн.}$, а термін окупності капіталовкладень – $2,2$ роки.

Ключові слова: сушильна камера, вологість, теплоємність, математична модель, сушарка, тепломасообмін, енергоефективність, температура, негативні внутрішні джерела тепла, теплопровідність, продуктивність, якість продукту, витрати енергії, режим, коефіцієнт теплообміну.

ANNOTATION

Didyk A.M. Justification of the design and technological parameters of a vibrating machine for drying walnuts. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 133 – Industrial Engineering. – Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2025.

The urgent scientific task of increasing productivity and reducing energy costs while maintaining the standard quality of the finished product during the drying of walnuts has been solved by developing and substantiating the design and technological parameters of a vibrating machine.

The relevance of the research is highlighted, its purpose is defined, and the main tasks for achieving the set goals are formulated. The scientific novelty of the work and its practical significance are characterized, and the author's personal contribution to the research is noted. Information on the testing of the obtained results and their publication is provided, and the structure and scope of the dissertation are presented.

The achievement of the goal of this work is reduced to solving the following scientific and applied tasks: based on the analysis of existing means for drying walnuts, as well as the results of theoretical and experimental studies, to develop a schematic diagram of a vibrating machine for drying walnuts; to develop a mathematical model of nut heating during the drying process depending on the initial conditions and technological parameters of the process; to develop a methodology and conduct research to determine the physical, mechanical, and thermophysical characteristics of walnuts, as well as changes in the intensity of negative internal heat sources during the drying process; develop and manufacture an industrial prototype of a vibrating machine for drying nuts; experimentally confirm the feasibility of using vibration as a means of intensifying the walnut drying process; develop a methodology and conduct experimental studies to establish rational parameters for the operation of the vibrating machine; verify the adequacy of the obtained mathematical model; conduct production

testing of a pilot industrial model of a vibrating machine for drying walnuts and evaluate its economic efficiency.

Energy consumption was minimized while maintaining the quality of walnuts during their convective drying in a vibrating machine. This was achieved by substantiating the design scheme and its technological parameters. A mathematical model of walnut heating was developed, which ensured the determination of its core temperature depending on the initial state of the material, operating parameters, and drying exposure. The model was obtained based on the analytical solution of the equation of unsteady heat conduction for the geometric figure “ball in a sphere” taking into account negative internal heat sources, the intensity of which varied according to an exponential law.

The influence of temperature, drying agent velocity, and vibration acceleration of the working chamber on the energy efficiency of the drying process and the patterns of change in the total and current intensity of internal heat sources in the material was established. It was determined that the heat capacity, thermal conductivity, and temperature conductivity of walnuts changed in accordance with the patterns characteristic of colloidal capillary-porous plant materials.

The research results can be used in the design and modernization of dryers with vibration action on the drying chamber, which reduces energy consumption, increases productivity, and improves the energy efficiency of the drying process.

The first section examines the state and prospects of walnut production in the world and Ukraine. It is noted that Ukraine is one of the world's top five walnut producers. A drawback is the fact that more than 80% of the nuts grown are sold whole (in their shells). The production of nut kernels, as well as the use of other parts of the nut, requires the processing of walnut crops with high moisture content on industrial production lines, the main part of which is drying equipment. An analysis of foreign and domestic dryers for post-harvest processing of walnuts was carried out. Radiation dryers are more energy-intensive and require high-tech automation tools and a high level of training for service personnel. For convection dryers, the main problem is measures and means to increase the intensity of the drying process. A hypothesis is

proposed that the vibrational effect on the processed medium reduces the aerodynamic resistance of the walnut layer by creating a pseudo-fluidized state, which in turn increases the heat transfer coefficient and intensifies the drying process. The goal, object, subject, and tasks of the research have been formulated.

The second chapter discusses the theoretical foundations of the drying process and possible ways to intensify it. Due to the thermolability of walnuts, the simplest method—increasing the temperature difference between the drying agent and the material—cannot be used. To determine the maximum possible temperature of the drying agent, a mathematical model of the drying process has been developed, which determines the temperature of the nut kernel at any time depending on the initial conditions and technological parameters. To determine the law of change in the amount of energy consumed for the evaporation of moisture from the material, the concept of negative internal heat sources is used, the intensity of which varies according to an exponential law. The theoretical basis for determining the thermophysical characteristics of walnuts is presented. The basis is the use of the laws of non-stationary heating of two semi-bounded rods, at the point of contact of which there is a heat source of constant power.

The third chapter presents the program and methodology for conducting experimental research, a description of the experimental setup, and the instruments used in the work.

Methods have been developed for determining the physical and mechanical characteristics of walnuts, in particular, dimensional and weight characteristics: equivalent nut diameter, sphericity coefficient, porosity coefficient of the nut layer, true and bulk density.

A methodology was developed, a diagram and a general view of the installation for determining the thermophysical characteristics of the material were presented. Three main thermophysical characteristics were determined: heat capacity, thermal conductivity, and temperature conductivity of walnuts.

A method for determining the heat transfer coefficient without and with vibration influence was developed. The temperature and speed of the drying agent, as

well as vibration acceleration at a fixed amplitude of the drying chamber oscillations, were selected as factors influencing the heat transfer coefficient. Nut drying curves were constructed.

The intensity of negative internal heat sources is characterized by two indicators: the initial intensity q_0 (at time $\tau=0$) and the coefficient k_1 , which characterizes the rate of change in intensity. Formulas for determining the numerical values of these quantities are presented.

A plan matrix of a multifactorial experiment was developed to determine the rational technological parameters of the vibrating machine. The factors selected were the temperature and speed of the drying agent and the vibration acceleration of the drying chamber at a fixed amplitude of its oscillations of 6.5 mm. The experiment was planned and the experimental data were processed using Mathematica 12.0 software. The main indicator of the dryer's efficiency-energy consumption per 1 kg of evaporated moisture-was selected as the optimization criterion.

The fourth section presents the results of the experimental research program.

The dimensional and weight characteristics of Chandler walnuts were determined. Of particular interest is the sphericity coefficient. For nuts of this variety, it is 91.08%, which is quite high. It can be argued that the assumption about the spherical shape of the nut, which was made when creating a mathematical model of the drying process, is acceptable. The dependence of thermophysical characteristics on the moisture content of the material was determined. The nature of these dependencies is similar to those of other plant materials, since they all belong to colloidal capillary-porous bodies.

The heat transfer coefficient with the use of vibration is 20–27% higher than without vibration at the same temperature and drying agent velocity. A hypothesis has been formed that vibration exposure to the treated medium reduces the aerodynamic resistance of the walnut layer by creating a pseudo-fluidized state, which in turn increases the heat transfer coefficient and intensifies the drying process. Drying curves were constructed, the nature of which confirms the hypothesis about the positive effect of vibration on the energy indicators of the drying process.

As a result of experimental studies, formulas were obtained for determining the main indicators characterizing the intensity of negative internal heat sources – the initial intensity q_0 and the coefficient k_1 .

As a result of experiments to determine the rational technological parameters of the drying process, regression equations were obtained and response surfaces were constructed. Analysis of the regression equation allowed us to determine the rational operating parameters: the temperature of the drying agent is 380C, its speed is 22.5 m/s, the vibration acceleration of the drying chamber is 65.6 m/s² at a constant amplitude of its oscillations of 6.5 mm.

Verification of the mathematical model showed a discrepancy between theoretical and experimental data of no more than 11%, and the statistical evaluation indicates the adequacy of the developed mathematical model of the walnut drying process.

The results of theoretical and experimental studies related to the justification of the design and technological parameters of a vibrating machine for drying walnuts have been implemented in the educational, methodological, and scientific work of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in Agriculture at Vinnytsia National Agrarian University in teaching the discipline “Processes and Apparatus of Biotechnological Production.”

The company Agromash-Kalina LLC received technical documentation for the manufacture of a prototype for further industrial development. The developed experimental industrial prototype of a vibrating machine for drying walnuts underwent production testing at the YAFK VITON private enterprise. As a result of experimental studies, it was established that at a vibration acceleration of $A\omega^2 = 65.6 \text{ m/s}^2$, coolant velocity $V = 22.5 \text{ m/s}$, and temperature $t = 38 \text{ }^\circ\text{C}$, the moisture content of walnuts was reduced from $W_p = 28\%$ to $W_k = 10\%$ within 8 hours while maintaining their quality indicators. Additionally, it was determined that the specific energy consumption was 3.91 MJ/kg of evaporated moisture, which was 15–17% less than in modern industrial convection dryers.

Production testing confirmed the effectiveness of using vibration to intensify the drying process. The main indicator of the energy efficiency of the dryer—the energy consumption for evaporating 1 kg of moisture—was 3.91 MJ/kg, which is 12–15% less than in modern convective dryers for agricultural use.

The results of the technical and economic evaluation of the developed experimental industrial prototype of a vibrating machine for drying walnuts demonstrated its superiority over the base dryer and showed that the implementation of the drying process using vibration on the layer of nuts intensifies the drying process and significantly reduces the energy consumption of the technological process of post-harvest processing of walnuts. The annual economic effect is UAH 184,500, and the payback period for capital investments is 2.2 years.

Keywords: drying chamber, humidity, heat capacity, mathematical model, dryer, heat and mass transfer, energy efficiency, temperature, negative internal heat sources, thermal conductivity, productivity, product quality, energy consumption, mode, heat transfer coefficient.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Kaletnik G., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prysiazniuk D., **Didyk A.** Substantiation of the Operating Parameters of Walnut Drying Equipment. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11. Issue 2. P. F27–F34. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).f4 (0,9 друк. арк., особистий внесок: розробка конструктивної схеми вібраційної машини – 0,15 друк. арк.).

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародних наукових баз (Index Copernicus)

2. Руткевич В.С., **Дідик А.М.** Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкаралупі. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2023. Т. 1. №1 (317). С. 230-236. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236> (0,76 друк. арк., особистий внесок: проведено огляд відомого сушильного обладнання – 0,38 друк. арк.).

3. Цуркан О.В., Спирін А.В., Твердохліб І.В., **Дідик А.М.** Обґрунтування способу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 5-11. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-21 (0,91 друк. арк., особистий внесок: проведено огляд відомого сушильного обладнання та описано конструктивну схему конвективно-вібраційної сушарки – 0,23 друк. арк.).

4. Цуркан О.В., Руткевич В.С., **Дідик А.М.** Теоретичні дослідження процесу сушіння волоських горіхів з використанням вібраційних технологій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2023. № 4 (323). С. 337-342. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342 (0,55 друк.

арк., особистий внесок: розглянув та описав якісні показники волоських горіхів в процесі обробки та зберігання – 0,18 друк. арк.).

5. Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.* 2024. №4 (333). С. 393-399. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333- 2- 61 (0,8 друк. арк., особистий внесок: проведено огляд відомого технологічного обладнання для процесу збирання та переробки волоських горіхів – 0,2 друк. арк.).

6. 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. (0,76 друк. арк., особистий внесок: провів аналіз машин для первинної обробки волоських горіхів та запропонував номенклатуру даних машини – 0,19 друк. арк.).

7. Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Оцінка ефективності процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2024. № 3 (114). С. 5-12. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1 (0,85 друк. арк., особистий внесок: огляд існуючих способів ефективності роботи конвективних сушарок – 0,21 друк. арк.).

8. Цуркан О.В., Спірін А.В., Гудзенко Н.М., Дідик А.М. Математична модель процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2024. № 4 (115). С.5-14. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-1 (0,95 друк. арк., особистий внесок: верифікація математичної моделі – 0,24 друк. арк.).

9. Цуркан О.В., Спірін А.В., Дідик А.М., Бондаренко М.П. Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2024. № 4 (115). С. 52-59. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7 (0,84 друк. арк., особистий внесок: обґрунтував перевагу вібраційного способу інтенсифікації процесу сушіння – 0,22 друк. арк.).

Патенти України

10. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., **Дідик А.М.**, Руткевич В.С. Конвективно-вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів: пат. 156940 Україна: МПК F26B 17/10 (2006.01); № и 2024 01129; заявл. 01.03.2024; опубл. 21.08.2024. Бюл. № 34. 10 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1815359/>

11. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., **Дідик А.М.**, Руткевич В.С. Конвективно-вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів: пат.159033 Україна: МПК F26B 17/10 (2006.01); № и 2024 04771; заявл. 04.10.2024; опубл. 16.04.2025. Бюл. № 16. 9 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1851703/>

Об'єкти права інтелектуальної власності

12. Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спірін А.В., **Дідик А.М.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Літературний текстовий твір наукового характеру з ескізом «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки». Свідоцтво № 128825 від 02.08. 2024; заяв. № с202405407 від 20.06. 2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1821758/>

13. Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спірін А.В., **Дідик А.М.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Літературний текстовий твір наукового характеру з ескізом «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів». Свідоцтво № 130915 від 29.10. 2024; заяв. № с202408113 від 1.10. 2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1830970/>

14. Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спірін А.В., **Дідик А.М.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Літературний текстовий твір наукового характеру з ескізом «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів». Свідоцтво № 130914 від 29.10. 2024; заяв. № с202408114 від 1.10. 2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1830970/>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ	26
1.1 Виробництво волоського горіха в світі та в Україні, перспективи розвитку	26
1.2. Технологія післязбиральної обробки горіха, роль процесу сушіння.....	30
1.3. Способи та технічні засоби реалізації процесу сушіння волоських горіхів	32
1.3.1 Аналіз наукових досліджень процесу сушіння волоських горіхів	32
1.3.2. Способи сушіння рослинних матеріалів	34
1.3.3. Особливості сушіння волоських горіхів	36
1.3.4 Засоби для сушіння волоських горіхів.....	38
1.4. Методи інтенсифікації процесу сушіння.....	45
1.4.1. Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння	45
1.4.2. Застосування вібраційного впливу для інтенсифікації сушіння волоських горіхів	47
1.5. Висновки, мета, об’єкт, предмет та завдання дослідження	50
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ	53
2.1 Фактори, що впливають на інтенсивність процесу сушіння	53
2.1.1 Основні фактори: температура та швидкість сушильного агенту	53
2.1.2 Фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалу	57
2.2 Граничні умови перебігу процесу тепломасообміну.....	60
2.2.1 Характеристика всіх граничних умов	60
2.3 Математична модель нагрівання в процесі сушіння волоських горіхів.....	64
2.3.1 Аналіз відомих математичних моделей теплопровідності сферичних тіл із внутрішніми джерелами тепла.....	64
2.3.2 Рівняння нестационарної теплопровідності	66
2.3.3 Внутрішні негативні джерела тепла.....	68
2.3.4 Основи теорії подібності в процесах сушіння	70
2.3.5 Рішення нестационарного рівняння теплопровідності для випадку сушіння волоських горіхів у вібраційній машині	72

2.4 Аналіз математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині	80
2.4.1 Коефіцієнт теплообміну при сушінні горіхів.....	80
2.4.2 Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів в вібраційній машині.....	82
2.5 Висновки до другого розділу	83
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	85
3.1. Програма експериментальних досліджень	85
3.2 Прилади для проведення експериментальних досліджень.....	92
3.3 Методика проведення експериментальних досліджень.....	100
3.3.1 Методика визначення фізико-механічних властивостей волоських горіхів	101
3.3.2. Методика визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів	104
3.4 Методика визначення залежності коефіцієнта теплообміну від технологічних параметрів процесу	108
3.5 Методика визначення інтенсивності внутрішніх негативних джерел тепла	113
3.6 Планування багатофакторного експерименту.....	115
3.7 Висновки до третього розділу.....	118
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	120
4.1 Визначення фізико-механічних характеристик волоських горіхів.....	120
4.1.1 Визначення розмірних та вагових характеристик волоських горіхів.....	120
4.1.2 Визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів.....	122
4.2 Визначення коефіцієнта теплообміну з урахуванням вібраційного впливу	125
4.3 Визначення інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла	130
4.4 Визначення раціональних технологічних параметрів роботи вібраційної машини для сушіння волоських горіхів.....	134
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	137

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБЛЕНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ.....	140
5.1 Економічне обґрунтування розробленої вібраційної машини	140
5.1.1 Визначення вартості розробленої машини	141
5.1.2 Визначення економічної ефективності розробленої машини	142
5.2 Місце вібраційної машини в технологічній схемі переробки волоських горіхів	149
5.3 Виробнича апробація результатів досліджень	151
5.4 Висновки до п'ятого розділу.....	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	155
ДОДАТКИ.....	169

ВСТУП

Актуальність теми. Волоські горіхи є цінним продуктом, їх споживають у чистому вигляді та в ролі компонентів препаратів для лікування різноманітних хвороб та як профілактичний засіб. Як харчовий продукт волоський горіх використовується в м'ясних та рибних стравах, салатах, соусах, випічці тощо. Для України його виробництво відіграє особливу роль, тому що він стає важливим експортним продуктом.

Україна входить у п'ятірку найбільших виробників волоських горіхів. Але волоський горіх, який пропонують українські експортери, на жаль, є переважно не сортовим і постачається в шкаралупі. Прибутки від експорту волоських горіхів можна значно збільшити, якщо поглибити ступінь переробки, включити в кінцевий продукт технології всі його складові – ядро, шкаралупу, перетинку та, навіть, перикарпій. Для цього потрібно переробляти горіхи на сучасних технологічних лініях, оснащених високопродуктивним і енергоефективним обладнанням.

Основою технології переробки більшості продукції галузі рослинництва є операція сушіння. Сушіння потрібне для підготовки матеріалу до тривалого зберігання або для приведення його в оптимальні умови для виконання наступних технологічних операцій. Так, для волоських горіхів, оптимальною вологістю для зберігання є 8...10%, у той же час із саду вони поступають із набагато більшою вологістю (іноді до 40%). Для проведення глибокої переробки, горіхи на операцію лущення мають надходити з вологістю 10...15%, але операція сушіння в усіх технологіях є найбільш енергозатратною, інколи на неї припадає до половини всієї потрібної енергії.

Більшість сучасних сушарок вичерпали свої можливості для збільшення енергоефективності процесу. Одним із засобів інтенсифікації процесу сушіння є застосування вібраційного впливу на шар матеріалу. Вібраційний вплив дозволяє зменшити аеродинамічний опір шару волоських горіхів, зруйнувати граничний шар навколо одиночного горіха, турбулізувати потік сушильного агенту. Окрім

того, параметри вібрації можна регулювати в широких межах, таким чином впливати на весь матеріал, що знаходиться в сушильній камері і на окремі його шари. На жаль, застосування вібраційного впливу на матеріал у конвективних вітчизняних сушарках поки що не знайшло гідного йому розповсюдження, тому розробка конструкції та визначення технологічних параметрів роботи вібраційної машини для сушіння волоських горіхів, безумовно, є актуальним завданням для наукових досліджень і практичного впровадження.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційне дослідження виконано у Вінницькому національному аграрному університеті. Основні результати було отримано в межах виконання госпдоговірних тематик «Дослідження енергоефективного вібраційного обладнання для сушіння сільськогосподарської сировини» (№ РК 0122U201669, термін виконання: 11. 2022-12.2023 рр.), «Розробка технологічного та енергоефективного сушильного обладнання для сушіння волоських горіхів» (№ РК 0125U003355, термін виконання: 09. 2025-09. 2026 рр.) та прикладного наукового дослідження, яке виконується за рахунок коштів державного бюджету «Підвищення конкурентоспроможності аграрного сектора України у воєнний час шляхом інноваційного розвитку виробництва експортно-орієнтованих видів продукції» (№ РК 0224U000303, термін виконання 01.2024 -12.2025 рр.).

Наукова гіпотеза полягає у тому, що вібраційний вплив на оброблюване середовище зменшує аеродинамічний опір шару волоських горіхів, шляхом створення псевдозрідженого стану, що збільшує коефіцієнт теплообміну та інтенсифікує процес сушіння.

Мета дослідження: підвищення продуктивності, зменшення енерговитрат, збереження якості при сушінні волоських горіхів, шляхом розробки та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини.

Завдання дослідження:

- на основі аналізу існуючих засобів для сушіння волоських горіхів, а також результатів теоретичних та експериментальних досліджень, розробити

конструктивну схему і 3D - модель вібраційної машини для сушіння волоських горіхів;

- розробити математичну модель процесу сушіння з визначенням зміни температури ядра горіху залежно від початкових умов і технологічних параметрів процесу;

- розробити методику та провести дослідження по визначенню фізико-механічних та теплофізичних характеристик волоських горіхів, а також зміни інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла в процесі сушіння;

- розробити та виготовити дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів;

- експериментально підтвердити доцільність застосування вібраційного впливу, як способу інтенсифікації процесу сушіння волоських горіхів;

- розробити методику та провести експериментальні дослідження для встановлення раціональних параметрів роботи вібраційної машини;

- здійснити перевірку адекватності отриманої математичної моделі;

- здійснити виробничу апробацію дослідно-промислового зразка вібраційної машини для сушіння волоських горіхів та оцінити її економічну ефективність.

Об'єкт дослідження - процес конвективного сушіння волоських горіхів у вібраційній машині.

Предмет дослідження — вплив початкових умов та технологічних параметрів процесу сушіння на енергетичні і якісні показники роботи вібраційної машини.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі використовували теоретичні й експериментальні методи досліджень. Для теоретичних досліджень використовували закони теплопередачі, теорію теплопровідності, теорію і техніку теплофізичного експерименту, методи математичної фізики для вирішення диференціальних рівнянь, зокрема перетворення Лапласа, моделювання процесів тепло- і масопереносу, зокрема введення поняття негативних внутрішніх джерел тепла. Експериментальні дослідження оцінки характеристик

вібраційного впливу проводили в лабораторних умовах на розробленій експериментальній установці з використанням відповідної апаратури. Для отримання рівняння регресії і перевірки адекватності отриманих експериментальних результатів використовували метод математичної статистики з використанням програми *Mathematica 12.0*.

Для дослідження процесу сушіння використовували такі методи:

- теоретичні (для аналітичного дослідження наявних проблем і розробки математичної моделі);
- експериментально-розрахунковий і чисельний (для аналізу процесів зміни інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла);
- математичного моделювання (розробка математичної моделі процесу сушіння, визначення характеристик вібраційного впливу);
- лабораторні (у лабораторних умовах на натурних зразках і моделях із застосуванням сучасних приладів, стандартного обладнання й спеціально розробленого пристрою та оснащення для визначення енергетичних затрат на реалізацію процесу);
- математичної статистики (для обробки експериментальних даних).

Наукова новизна одержаних результатів.

Уперше:

- розроблена математична модель нагрівання в процесі сушіння волоських горіхів із визначенням температури ядра волоського горіха залежно від початкових умов, технологічних параметрів та експозиції сушіння шляхом аналітичного розв'язання диференційного рівняння нестационарної теплопровідності для геометричної фігури «куля в сфері» з негативними внутрішніми джерелами тепла, інтенсивність яких змінюється за експоненціальним законом;
- встановлено залежність температури та швидкості сушильного агента, віброприскорення сушильної камери на енергетичну ефективність технологічного процесу та взаємозв'язок між сумарною та поточною інтенсивністю внутрішніх джерел тепла.

Набули подальшого розвитку:

- залежності теплофізичних характеристик матеріалу від форми зв'язку внутрішньої вологи з сухою речовиною.

Практичне значення одержаних результатів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язані з обґрунтуванням конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини для сушіння волоських горіхів, упроваджені у навчально-методичну та наукову роботу кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисципліни «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв».

Розроблений дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів пройшов виробничу перевірку на базі ПП «ЯФК-ВІТОН» (Вінницька обл., Могилів-Подільський р-н., село Велика Кісниця, вул. Ринкова, буд. 4). У ході випробувань встановлено, що при віброприскоренні $A\omega^2 = 65,6 \text{ м/с}^2$, швидкості теплоносія $V = 22,5 \text{ м/с}$ та температурі $t = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ відбувається зниження вологості з $W_{\text{п}} = 28\%$ до $W_{\text{к}} = 10\%$ за 8 годин, при збереженні його якості. Також визначено, що витрати енергії на 1 кг випаруваної вологи склали 3,91 МДж/кг, що на 15...17 % менше, ніж у сучасних конвективних сушарках.

Передано конструкторську і технологічну документацію підприємству ТОВ «Агромаш-Калина» (Вінницька область, м. Калинівка) на виготовлення дослідно-промислових зразків вібраційних машин для сушіння волоських горіхів.

Особистий внесок здобувача. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, представлених у дисертаційній роботі, автор отримав самостійно. Постановка мети, формулювання завдань й узагальнення результатів здійснювалися за участю наукового керівника, а також частково у співпраці з авторами спільних наукових публікацій. Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи висвітлювалися й отримали позитивну оцінку на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні процеси

агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи» м. Вінниця, 20-21 жовтня 2022.; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції» м. Вінниця, 19-20 жовтня 2023 р.; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів» м. Вінниця, 17-18 жовтня 2024 р.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 14 наукових працях, у тому числі: 1 у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection; 8 статей в наукових фахових виданнях України (категорії Б); 2 патенти на корисну модель та 3 свідоцтва на авторське право на твір.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 190 сторінок, у тому числі 8 додатків на 20 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 169 сторінок і містить 40 рисунків, 14 таблиць та 144 формули. Список використаних джерел нараховує 129 посилань на 14 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Виробництво волоського горіха в світі та в Україні, перспективи розвитку

Волоський горіх належить до провідних плодових культур світового значення, що поєднує високу харчову, біологічну та промислову цінність [1, 2]. Унікальний хімічний склад ядра визначає його універсальність застосування, а також стабільний попит на світовому агропродовольчому ринку [3].

Хімічний склад ядра волоського горіха характеризується високим вмістом ліпідів (60–70 %), білків (15–20 %), вуглеводів (10–15 %) та клітковини (близько 5 %) [4]. Ліпідна фракція представлена переважно поліненасиченими жирними кислотами, серед яких домінує лінолева (50–60 %), α -ліноленова (10–15 %) та олеїнова (15–20 %) кислоти [5; 6]. Таке співвідношення забезпечує оптимальний ліпідний баланс та сприяє профілактиці серцево-судинних захворювань, а також метаболічних порушень [7; 8].

Крім того, ядра волоських горіхів містять значні кількості вітамінів групи В, токоферолів, поліфенольних сполук та мінералів (Mg, K, Fe, Zn, Cu, Mn), що обумовлює їх антиоксидантні, імуномодуючі та протизапальні властивості [9; 10]. Наявність мелатоніну та юглону надає додаткових біологічних ефектів, пов'язаних з регуляцією старіння та протипухлинною активністю [11; 12].

В харчовій промисловості волоські горіхи використовується як стратегічно важлива сировина для збагачення продукції білками, ненасиченими жирними кислотами й антиоксидантами [13]. Додавання 10-15 % ядер волоських горіхів у хлібобулочні вироби, молочні продукти, соуси та шоколадні маси дозволяє суттєво підвищити поживну цінність та органолептичні характеристики кінцевої продукції [14]. Особливе значення має олія, одержана з дрібних фракцій ядер волоських горіхів, яка отримується методом холодного пресування. Вона містить

понад 70 % поліненасичених жирних кислот та значні кількості токоферолів, що забезпечує її лікувально-профілактичні властивості [15, 16].

У фармацевтичній галузі застосовуються як ядра волоського горіха, так і інші компоненти фракційного складу горіха (шкаралупа, перетинка та перикарпій). Вони багаті на поліфеноли та дубильні речовини, які проявляють протипухлинну, антимікробну та протизапальну активність [17, 18]. Препарати на основі горіхових екстрактів використовуються для профілактики та лікування патологій серцево-судинної та ендокринної системи [19].

Промислове застосування волоського горіха також є різноплановим. Перикарпій та шкаралупу використовують, як сировину для лакофарбової та текстильної промисловості завдяки високому вмісту натуральних барвників та дубильних речовин [20, 21]. Це робить горіх не лише харчовим, а й промислово значущим продуктом, що відповідає сучасним тенденціям екологізації виробництва.

Варто підкреслити, що частка використання волоських горіхів у різних галузях є нерівномірною: найбільше він використовується у харчовій промисловості (близько 45 %), кондитерській (25 %), фармацевтичній (15 %), виробництві олії (10 %) та інших напрямках (5 %). Це співвідношення наведено на (рис. 1.1), що демонструє структуру розподілу застосувань волоського горіха у світовій практиці.

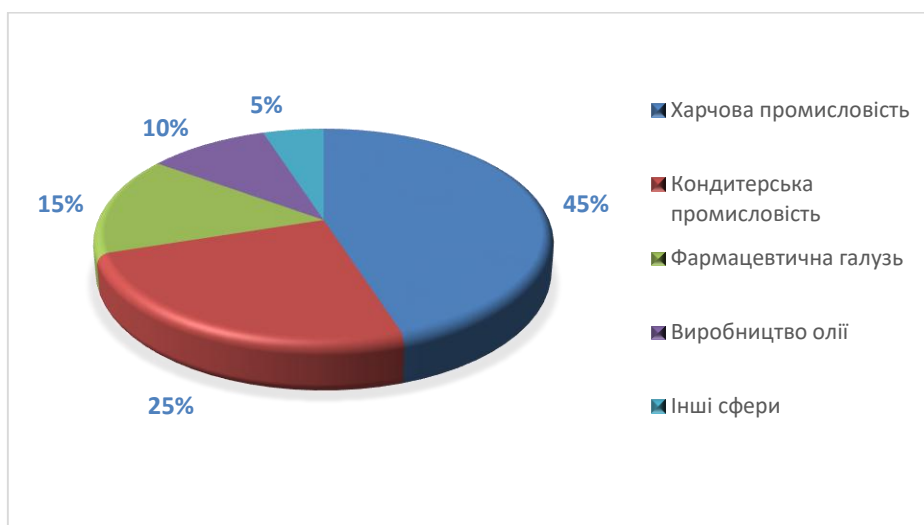


Рисунок 1.1 – Використання волоських горіхів в різних галузях

За даними [22], в сезоні 2023/24 року світове виробництво волоського горіха у шкаралупі перевищило 2,6 млн. т, причому понад 50 % цього обсягу забезпечує Китай, близько 30 % – США (штати Каліфорнія та Орегон), тоді як інші країни (Іран, Туреччина, Чилі, Україна) формують відносно менші, але стабільні частки. Така концентрація виробництва свідчить про високу залежність світового ринку від кліматичних умов в даних регіонах (рис. 1.2).

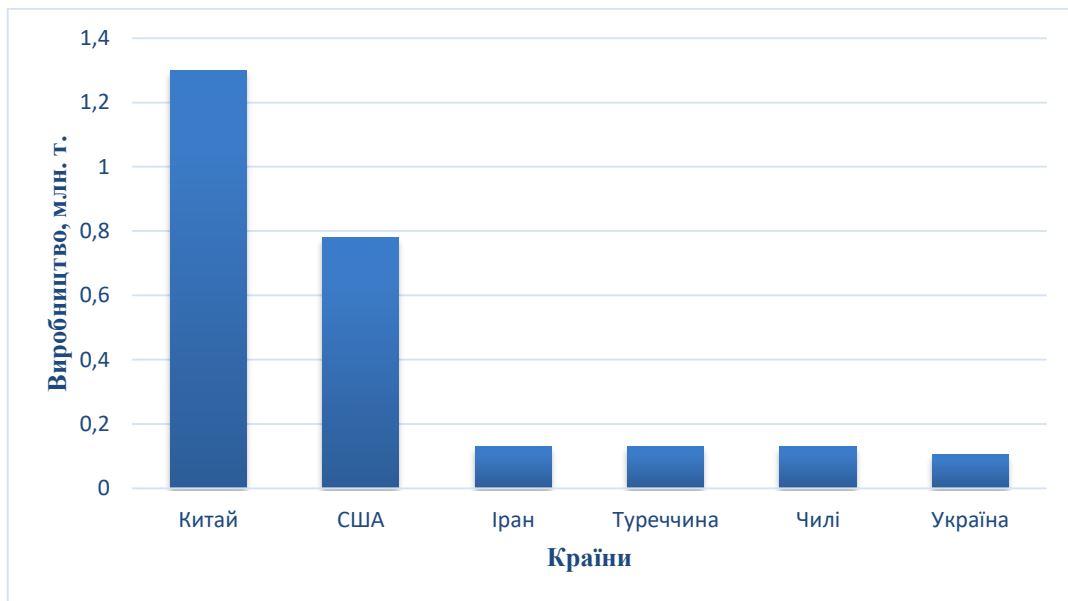


Рисунок 1.2 - Виробництво волоських горіхів у світі в сезоні 2023/2024 р.

В Україні волоський горіх традиційно культивується протягом століть, в цьому велику роль відіграють агрокліматичні умови більшості регіонів країни, які є сприятливими для його вирощування. За оцінками [23], валове виробництво горіха в сезоні 2023/24 року становило близько 106 тис. т, що виводить Україну до п'ятірки провідних виробників волоських горіхів у світу. Проте вирощування волоських горіхів є специфічним: понад 70 % врожаю формується у приватному секторі – домогосподарствах та дрібних фермерських господарствах (рис. 1.3), де технології догляду, збору та післязбиральної обробки переважно залишаються на традиційному рівні. Тому така особливість знижує продуктивність саду та якість продукції, що обмежує їх експортний потенціал.

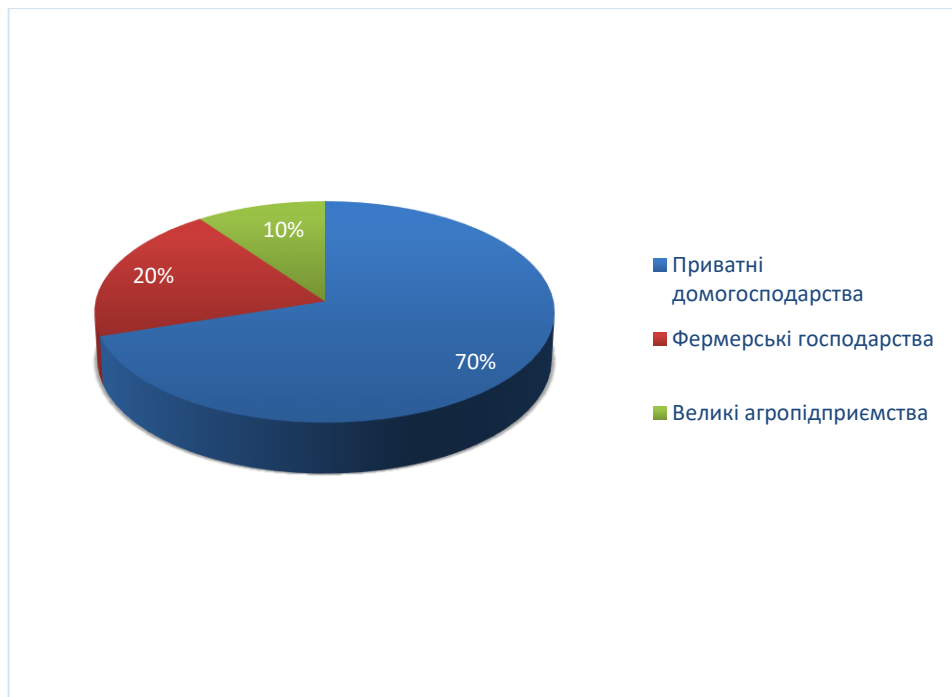


Рисунок 1.3 – Структура площ вирощування волоських горіхів в Україні

Важливим стримуючим фактором розвитку галузі в Україні є недостатній рівень оновлення сортових насаджень. Значна частка насаджень представлена старими садами з низьким потенціалом врожайності, тоді як у провідних країнах світу переважають інтенсивні сади з високопродуктивними сортами, адаптованими до механізованого збирання [24]. Крім того, сучасні виклики, пов'язані з воєнною агресією, втратами частини продуктивних площ та ускладненою експортною логістикою, суттєво зменшують конкурентоспроможність української продукції на міжнародних ринках.

Попри наявні проблеми, динаміка споживчого попиту формує сприятливі перспективи розвитку галузі. У країнах Європейського Союзу, на Близькому Сході та в Азії спостерігається зростання попиту на ядро волоського горіха, що зумовлено підвищенням інтересу до здорового харчування та продуктів із високим вмістом антиоксидантів і поліненасичених жирних кислот [25]. Для України це створює передумови до розширення експорту, за умови модернізації технологій вирощування, впровадження сучасних ліній післязбиральної обробки (зокрема сушіння, калібрування і пакування) та дотримання міжнародних стандартів якості [26, 27].

1.2. Технологія післязбиральної обробки горіха, роль процесу сушіння

Післязбиральна обробка волоського горіха охоплює комплекс технологічних операцій, які забезпечують перехід від моменту збору врожаю в саду до отримання товарної продукції, придатної для тривалого зберігання та реалізації. Якість виконання цих операцій визначає рівень збереження поживних речовин ядра, зовнішній вигляд шкаралупи та відповідність міжнародним стандартам, що безпосередньо впливає на експортний потенціал продукції [28].

Збір волоських горіхів в сучасних господарствах здійснюється як вручну, так і за допомогою механізованих засобів. Використання вібраційних струшувачів і спеціалізованих комбайнів дозволяє значно скоротити витрати ручної праці та зменшити втрати врожаю. Зібрані плоди потребують негайного очищення від зеленої оболонки (перикарпію), оскільки її тривала присутність призводить до потемніння шкаралупи й розвитку мікроорганізмів. Для цього застосовуються машини для лущення та гідравлічні системи промивання, які одночасно усувають залишки забруднень та сторонніх домішок [29, 30].

Ключовим етапом післязбиральної обробки є сушіння. Свіжозібрані волоські горіхи містять від 25 до 40 % вологи, тоді як для тривалого зберігання цей показник не має перевищувати 8-10 %. Недостатнє висушування призводить до активізації ферментативних процесів, розвитку плісняви та утворення мікотоксинів, у той час як пересушування негативно впливає на смак і цілісність ядра. Традиційно в промисловому виробництві застосовують конвективні сушарки, де процес сушіння відбувається шляхом циркуляції підігрітого повітря навколо матеріалу [31; 32].

Підприємства з переробки волоських горіхів використовують технологічні лінії безперервної дії, які забезпечують автоматизацію більшості процесів - від надходження свіжих плодів до випуску готової продукції.

Типова лінія включає вузол для приймання і попереднього очищення горіхів, машину для видалення зеленої оболонки, систему миття, транспортери для подачі продукції в сушильні машини, секції для калібрування та сортування,

а також пакувальне обладнання. У багатьох випадках ці лінії обладнані оптичними сортувальними системами, здатними розпізнавати горіхи з дефектами шкаралупи чи ядра та автоматично їх вибраковувати [33].

Важливою складовою є сушильні машини, інтегровані в лінію. Вони працюють за принципом шахтного або тунельного сушіння із рециркуляцією повітря, що дозволяє рівномірно знижувати вологість. У передових підприємствах застосовуються енергоощадні технології, а саме рекуперацію тепла, теплові насоси та сонячні колектори. Це значно зменшує енергозатрати та підвищує рентабельність виробництва, але такий підхід вимагає значних капіталовкладень.

На завершальних етапах технологічної лінії волоські горіхи сортуються за розмірами: великі, середні та дрібні плоди формуються у партії, придатні для реалізації в різних сегментах ринку. Пакування здійснюється у мішки з натуральних тканин, поліетиленові або поліпропіленові пакети, а для експорту часто застосовують вакуумні та газомодифіковані упаковки, які подовжують термін зберігання. Зберігання продукції відбувається у холодильних камерах або складських приміщеннях з контрольованими параметрами мікроклімату [23].

Таким чином, сучасна післязбиральна технологія базується не лише на окремих операціях, а й на інтегрованих технологічних лініях, які забезпечують комплексну механізацію та автоматизацію процесів. Структурна схема технологічної лінії післязбиральної обробки волоського горіха представлена на рис 1.4.

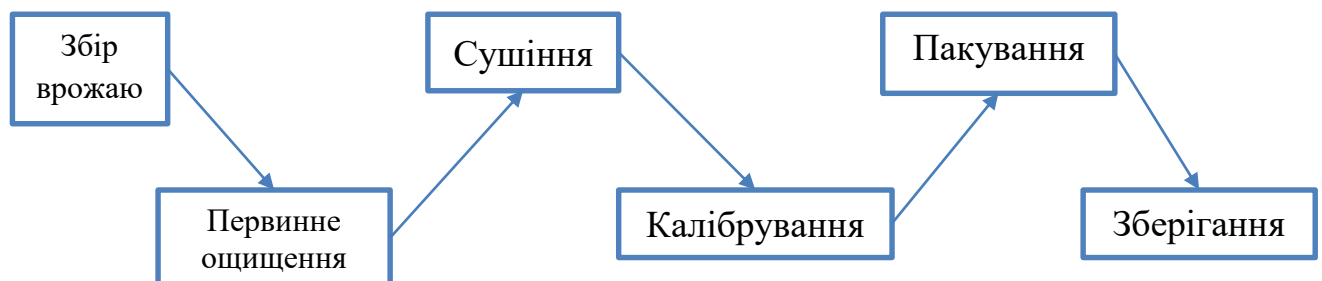


Рисунок 1.4 – Структурна схема технологічної лінії післязбиральної обробки волоських горіхів.

Технологічна лінія включає, в тому числі, операцію сушіння, адже саме вона визначає якість і конкурентоспроможність продукції на світовому ринку. Удосконалення сушильних технологій та впровадження сучасних технологічних ліній є стратегічним напрямом розвитку горіхівництва в Україні [32, 34, 35].

1.3. Способи та технічні засоби реалізації процесу сушіння волоських горіхів

1.3.1 Аналіз наукових досліджень процесу сушіння волоських горіхів

Сушіння волоських горіхів є однією з найбільш енергомістких операцій післязбиральної обробки, що значною мірою визначає якість ядра, термін зберігання та експортну придатність продукції. Внаслідок високої початкової вологості плодів (25–35 %) та неоднорідності їхньої структури ефективність процесу сушіння залежить від комплексу параметрів — температури, швидкості сушильного агенту та умов руху матеріалу в сушарці. Оптимізація цих параметрів стала предметом численних наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном.

Результати одних із перших системних досліджень процесу сушіння волоських горіхів були представлені в роботі [36]. У ній експериментально обґрунтовано параметри конвективно-вібраційного сушіння горіхів та показано, що за температури 35–40 °C і швидкості теплоносія 18–22 м/с досягається найвища рівномірність сушіння. Застосування вібраційного впливу дозволяє скоротити тривалість процесу приблизно на 20 % без погіршення якості ядра, що підтверджує ефективність комбінованих методів сушіння.

В публікації [37] розглянуто системний підхід до побудови технологічних процесів післязбиральної обробки рослинних матеріалів. Автор запропонував методологію аналізу та оптимізації технологічних ліній очищення, сушіння і сортування, що базується на комплексному урахуванні енергетичних і якісних показників. Хоча робота не присвячена безпосередньо процесу сушіння, вона сформувала науково-методичне підґрунтя для подальших розробок сушильного обладнання нового покоління.

Подальший розвиток напрямку конвективно-вібраційного сушіння відображено у дослідженні [38], де створено математичну модель процесу сушіння волоських горіхів. Модель враховує температуру сушильного агенту, швидкість повітряного потоку, амплітуду та частоту коливань шару матеріалу. Результати проведених досліджень показали, що інтенсифікація видалення вологи відбувається за амплітуди 6,5 мм і частоти 16 Гц [24].

У навчальному посібнику [39] систематизовано загальні закономірності тепломасообміну в технологічних процесах харчової промисловості. Викладені теоретичні положення щодо законів теплопровідності та масоперенесення, а також умови теплообміну в капілярно-пористих тілах, які становлять наукову основу для моделювання процесів сушіння біоматеріалів, зокрема горіхів.

У дослідженні [40] розглянуто вплив розподілу швидкостей повітряного потоку на рівномірність вологості зернових матеріалів після сушіння. Автором обґрунтовано доцільність оптимізації профілю швидкості потоку для покращення енергоефективності апаратів, що є релевантним при конструюванні сушильних камер для плодово-горіхової сировини.

Сучасні українські дослідження у цьому напрямі відображено в праці [41], де, використовуючи методи CFD-моделювання, автори дослідили рух повітряних потоків у конвективній сушарці для волоських горіхів та встановили оптимальні конструктивно-технологічні параметри ($H = 784$ мм, $\alpha = 53,3^\circ$ та $n = 148$ об/хв.), що, на їх думку, зберігає якість продукту.

Міжнародний досвід дослідження процесів сушіння узагальнено у монографії [34], де показано, що інтенсифікація тепломасообміну можлива за рахунок механічного перемішування або вібраційного збурення шару матеріалу, що зменшує градієнти вологи та підвищує ефективність сушіння.

У роботі [37] експериментально встановлено вплив температури та швидкості повітряного потоку на інтенсивність сушіння харчових матеріалів. Автори показали, що оптимальними для горіхоплідних культур є температура 35–45 °С і швидкість повітря 18–24 м/с, що забезпечує високу якість ядра при мінімальних енерговитратах.

У дослідженнях [42] розроблено підходи до інтенсифікації процесів сушіння біологічних матеріалів за допомогою вібраційних та імпульсних повітряних потоків. Згідно з результатами, такі методи зменшують питомі енерговитрати на 20–25 % та покращують рівномірність сушіння, що узгоджується з вітчизняними експериментальними даними [36, 38, 41].

Проведений аналіз свідчить, що в українській науковій школі сформовано цілісний підхід по дослідженню та удосконаленню процесу сушіння волоських горіхів, який поєднує експериментальні дослідження, математичне моделювання та інженерні рішення. Разом із тим, комплексних робіт, де одночасно розглядаються теоретичні, конструктивні й енергетичні аспекти вібраційного сушіння горіхів, у літературі обмежена кількість. Тому подальші дослідження спрямовані на розроблення та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дослідно-промислової вібраційної машини для волоських горіхів, що забезпечить зменшення енерговитрат і підвищення якості готової продукції.

1.3.2. Способи сушіння рослинних матеріалів

Сушіння рослинної сировини, зокрема волоських горіхів, є складним процесом, що визначається як морфологічними особливостями продукту, так і характером зв'язку вологи в його структурі. Відповідно до класифікації колоїдних та капілярно-пористих тіл, рослинні матеріали відзначаються наявністю кількох форм зв'язаної вологи: адсорбційної, осмотично утримуваної, капілярної та вільної. Це зумовлює складність процесів тепломасообміну й потребує використання різних технологічних підходів залежно від фізико-хімічної природи матеріалу [43, 44].

Для волоських горіхів характерна різна форма зв'язку вологи. З одного боку, ядро належить до колоїдних тіл, де вода міцно зв'язана білково-жировими комплексами і вивільняється з великою енергетичною затратністю. З іншого, шкаралупа є типовим капілярно-пористим середовищем, у якому волога перебуває переважно у вільному та капілярному станах, що створює градієнт міграції вологи під час сушіння. Саме ця особливість пояснює необхідність

багатостадійного режиму сушіння горіхів: на початковому етапі активно видаляється вільна та капілярна волога зі шкаралупи, тоді як на завершальному - дифузійно зв'язана волога ядра [45, 46].

У світовій практиці сушіння рослинних матеріалів, включаючи горіхоплідні культури, застосовують різні технологічні підходи.

Конвективне сушіння, що ґрунтується на використанні нагрітого повітря або газових сумішей, є найбільш поширеним завдяки технологічній простоті та можливості регулювання режимів. Разом з тим воно супроводжується значними енерговитратами та ризиком локального перегріву ядра, що негативно впливає на смакові й харчові властивості продукту [47].

Контактне сушіння, яке реалізується у барабанних і пластинчастих установках, забезпечує високі швидкості теплопередачі, проте для волоських горіхів воно малоприслатне через ймовірність термічного пошкодження ядра та нерівномірність прогрівання.

Радіаційні методи, зокрема інфрачервоне сушіння, дозволяє прискорити дифузійний вихід вологи з колоїдної матриці ядра та зберегти органолептичні властивості. Дослідження [48] показали, що поєднання інфрачервоного і конвективного нагріву дозволяє скоротити тривалість сушіння волоських горіхів на 25–30 % при збереженні якості ядра.

У випадку високовартісної або біологічно активної сировини використовують сублімаційне сушіння, що відбувається шляхом переходу вологи з твердого стану безпосередньо у пароподібний. Для волоських горіхів цей метод не знайшов широкого застосування у промисловості через високу собівартість, проте він залишається актуальним для виробництва дієтичних і фармацевтичних продуктів [49].

Сучасні тенденції у галузі спрямовані на впровадження комбінованих методів, зокрема конвективно-вібраційних, конвективно-інфрачервоних і мікрохвильових технологій. За даними досліджень [50], використання вібраційного впливу під час сушіння волоського горіха сприяє зменшенню товщини граничного шару повітря та вирівнюванню температурно-вологісного

поля, що підвищує ефективність масообмінних процесів. Це дозволяє скоротити тривалість сушіння на 20–25 % та знизити питомі енерговитрати.

Таким чином, способи сушіння рослинних матеріалів базуються на врахуванні їхньої колоїдної та капілярно-пористої природи. Для волоського горіха найбільш доцільним є використання комбінованих методів сушіння з елементами вібраційного впливу, які забезпечують збереження біологічної цінності ядра, підвищують енергоефективність процесу та формують стабільну якість продукції.

1.3.3. Особливості сушіння волоських горіхів

Сушіння рослинних матеріалів є однією з ключових операцій післязбиральної обробки, яка забезпечує мікробіологічну безпеку та збереження якісних характеристик продукції. Проте специфіка даного процесу значною мірою залежить від морфології та фізико-хімічних властивостей конкретної культури. У випадку сушіння зернових і бобових культур цей процес відносно простий завдяки наявності однорідної пористої структури, що полегшує міграцію вологи, тоді як у плодах із щільною оболонкою, таких як волоський горіх, цей процес має низку особливостей [51,52].

Волоські горіхи належать до капілярно-пористих тіл із колоїдними властивостями ядра, у якому волога перебуває у різних формах зв'язку: капілярній, осмотичній та адсорбційній. Як показали дослідження [23], найбільш енергоємним є видалення вологи, адсорбованої клітинними структурами ядра, що значно ускладнює сушіння у порівнянні з культурами, де переважає капілярна вода. Додатковим бар'єром виступає шкаралупа, проникність якої для водяної пари суттєво нижча, ніж оболонки зернових чи олійних культур, що підтверджено експериментами [53, 54].

Геометричні розміри плодів волоського горіха також мають вирішальне значення. Середній діаметр плоду сягає 30-50 мм, що у 5-8 разів перевищує розміри зерна пшениці чи кукурудзи. Це збільшує шлях дифузії вологи та формує внутрішні градієнти температури і вологості. За даними [25], саме великі

розміри плодів є фактором, що зумовлює необхідність тривалих режимів сушіння та застосування комбінованих методів теплопередачі для уникнення пересушування поверхневих шарів.

Особливу увагу при сушінні волоських горіхів необхідно приділяти стабільності біохімічних компонентів. Високий вміст ненасичених жирних кислот (лінолева та ліноленова) робить ядро чутливим до окислювальних реакцій, які інтенсифікуються при температурі понад 50 °C [55, 56]. Дослідження [57] доводять, що перегрівання під час сушіння призводить до прискореного згіркнення та зниження антиоксидантної активності. Тому для горіхів критично важливим є підтримання контрольованих температурних режимів.

На відміну від зернових культур, де основним інструментом інтенсифікації є підвищення температури сушильного агента та швидкості його руху, для волоських горіхів цей підхід обмежений через ризик пошкодження ядра. Тому сучасні дослідження орієнтовані на застосування комбінованих методів. Експерименти [58, 59] показали, що поєднання інфрачервоного випромінювання з конвективним нагрівом скорочує тривалість сушіння на 25-30 % без негативного впливу на колір і смак ядра. В роботах інших вчених [60, 61] доведено перспективність застосування мікрохвильового сушіння у поєднанні з конвекцією, яке забезпечує швидке прогрівання внутрішніх шарів і рівномірний розподіл температури.

Особливість сушіння волоських горіхів порівняно з іншими рослинними матеріалами полягає у наявності щільної шкаралупи з низькою паропроникністю, великому розмірі плоду та високій чутливості ядра до температурних перевантажень. Це вимагає використання спеціалізованих технологічних та комбінованих методів сушіння, спрямованих на одночасне забезпечення інтенсивності процесу і збереження якості продукції.

1.3.4 Засоби для сушіння волоських горіхів

В умовах інтенсивного розвитку горіхівництва однією з ключових операцій післязбиральної обробки є операція сушіння. Сучасні сушильні машини дозволяють не лише скоротити тривалість процесу, а й забезпечити контроль вологості та температури, що мінімізує втрати та покращує якість ядра. На ринку України представлений широкий спектр сушильних машин та комплексів, які відрізняються продуктивністю та конструктивно-технологічними параметрами.

На (рис 1.5) показана сушарка для волоських горіхів, яка відноситься до промислових моделей середнього класу. Об'єм робочої камери складає 2м³, що дозволяє висушувати до 2000 кг/добу при початковій вологості волоських горіхів 24% [62].



Рисунок 1.5 - Сушарка для волоських горіхів в шкаралупі

Основними особливостями даної сушарки є достатньо висока продуктивність і наявність базової системи контролю температури. Однак, конструктивні особливості сушарки створюють певні труднощі під час її завантаження та розвантаження, що знижує зручність експлуатації обладнання, ефективне завантаження та розвантаження сушарки.

Процес перемішування волоських горіхів у сушильній камері є нерівномірним, що збільшує час сушіння зниження вологості на окремих етапах сушіння. А робота шнека супроводжується частковим їх дробленням, та призводить до погіршення якості готової продукції під час подальшої переробки.

Сушарка СКМ2400Е (рис. 1.6) призначена для сушіння волоських горіхів у невеликих та середніх господарствах. Її бункер вміщує до $2,4\text{м}^3$ сировини, що дозволяє висушити до 1400 кг/добу при початковій вологості волоських горіхів 26% [63].

Переваги даної машини порівняно з аналогами полягають в тому, що вона має невеликі габаритні розміри, які полегшують її мобільність та монтаж. Нагрів здійснюється електричним способом, який дозволяє більш точно регулювати температуру та час сушіння.

При наявності позитивних технічних характеристик дана сушарка має низку конструктивно-експлуатаційних недоліків. За умов завантаження значного об'єму сировини інтенсивність циркуляції повітря в бункері не завжди є достатньою, що спричиняє нерівномірність нагріву матеріалу. Як наслідок, у різних зонах бункера швидкість зниження вологості відрізняється, що подовжує тривалість процесу сушіння та зумовлює додаткові енерговитрати.

Робота шнекового механізму, що використовується для часткового перемішування матеріалу, не гарантує рівномірного розподілу волоських горіхів по об'єму сушильної камери. Тому спостерігається тенденція до дроблення окремих плодів, особливо на початкових етапах сушіння, коли ядро ще має підвищену вологість і знижену механічну міцність. Це призводить до втрати цілісності продукту й ускладнює подальші технологічні операції з його переробки.



Рисунок 1.6 - Сушарка для волоських горіхів СКМ2400Е

Контроль температурного режиму здійснюється лише в одній точці, що не дозволяє своєчасно виявляти локальні відхилення у зоні біля стінок сушильної камери або в областях з менш інтенсивним повітрообміном. У результаті, в окремих ділянках може відбуватися як перегрів, так і недостатнє висушування, що негативно впливає на однорідність кінцевого продукту.

Додатковим чинником є значне енергоспоживання обладнання. Оскільки тривалість сушіння становить від 24 до 36 годин залежно від початкової вологості. Експлуатація машини потребує значних витрат електроенергії.

Сушарка для волоського горіха (рис 1.7) продуктивністю 1000 кг/добу поєднує в собі технологічну універсальність та відносно просту конструкцію. Однією з її ключових переваг є можливість використання різних джерел енергії, таких як електроенергія, тверде чи рідке паливо, що дозволяє адаптувати процес сушіння до наявної інфраструктури та економічних умов господарств. Ці особливості підвищують гнучкість виробництва і зменшують залежність від одного виду енергоресурсу. Наявність регулятора температури і індикатора температурного режиму дає змогу забезпечити контроль процесу сушіння, що дозволяє підтримувати стабільні умови і зменшити ризик перегріву або пересушування волоських горіхів, наслідком чого порішнена якість кінцевого продукту, а також збереження органолептичних і харчових властивостей ядра [64].



Рисунок 1.7 - Сушарка для волоських горіхів

Сушарка також відзначається компактністю і можливістю автономної роботи, що дозволяє обробляти продукцію без постійного втручання оператора. Така особливість сприяє економії трудових ресурсів та підвищує ритмічність виробничого процесу. Використання примусової циркуляції повітря дозволяє уникнути основних недоліків природного сушіння, таких як нерівномірне підсушування чи потемніння ядра.

Водночас конструктивний аналіз показує, що сушарка має й певні недоліки. Перш за все, нерівномірне завантаження або різниця у вологості горіхів може призводити до появи локальних зон недосушування або пересушування, що негативно позначається на однорідності партії і потребує додаткового контролю або сортування продукції. Енергоспоживання залежить від тривалості сушіння та обраного джерела нагріву, тому у випадку довготривалого режиму або несприятливих зовнішніх умов витрати на паливо чи електроенергію можуть бути значними. Конструкція завантаження та вивантаження без конвеєрного механізму, хоч і спрощує обладнання, робить процеси трудомістким. Окрім того, контроль температури здійснюється лише в одній точці, що не дозволяє виявляти локальні перегріви або недостатній нагрів у товщі завантаженого шару, що іноді призводить до неоднорідності висушування.

Сушильна лінія від компанії «ГорвПром» (рис. 1.8) представляє собою сучасне обладнання, що поєднує високі технічні характеристики з ефективністю енергоспоживання. Однією з переваг є використання інфрачервоних випромінювачів імпульсного типу, які дозволяють досягти швидкої та рівномірної дегідратації сировини, що сприяє збереженню органолептичних і харчових властивостей продуктів, таких як колір, аромат і смак.

Конструктивно лінія оснащена автоматичною системою подачі сировини, яка знижує трудові витрати та підвищує ритмічність виробничого процесу. Наявність транспортерної стрічки дозволяє гнучко налаштовувати обладнання під конкретні виробничі потреби, забезпечуючи високу продуктивність до

1000 кг/добу. Інтегрована система вентиляції та відбивачів сприяє ефективному розподілу тепла, що забезпечує рівномірне сушіння на всіх етапах процесу.

Незважаючи на численні переваги сушильної лінії вона має і свої певні конструктивні та технологічні недоліки. Одним із таких є відсутність зонального контролю температури в різних частинах робочої камери. Це може призвести до локальних перегрівів або недостатнього нагріву сировини, що впливає на якість кінцевого продукту та потребує додаткового контролю з боку оператора.



Рисунок 1.8 – Сушильна лінія для волоських горіхів

Одним із основних недоліків даної сушильної лінії є швидке видалення вологи під дією інфрачервоного нагріву, що зумовлює розвиток внутрішніх напружень в шкаралупі, що призводить до її розтріскування та втрати товарної якості волоських горіхів. Необхідність регулярного технічного обслуговування та очищення транспортної стрічки від залишків сировини. Недотримання цих процедур може призвести до зниження ефективності сушіння, утворення локальних зон перегріву та зниження якості кінцевого продукту. Хоча інфрачервоні випромінювачі забезпечують швидке сушіння вони варіюються в залежності від типу та вологості сировини, що безпосередньо впливає на енергоспоживання та загальну ефективність процесу сушіння [65].

Сушильна шафа від компанії «ГорвПром» (рис. 1.9) для сушіння волоських горіхів є прикладом ефективного обладнання в промислових умовах. Однією з основних переваг даної машини є використання інфрачервоних випромінювачів,

що забезпечують швидке та рівномірне нагрівання волоських горіхів. Це дозволяє зберігати органолептичні та харчові властивості продуктів [66].

Конструктивно шафа оснащена лотками розміром 600×600 мм, що дозволяє ефективно використовувати внутрішній простір та забезпечує зручність завантаження та вивантаження сировини. Наявність автоматичних систем управління температурою та вологістю дозволяє точно налаштовувати процес сушіння відповідно до вимог технології, що підвищує якість кінцевого продукту.



Рисунок 1.9 - Сушильна шафа для волоських горіхів

Але дана конструкція має і ряд певних недоліків, а саме відсутність зонального контролю температури, що може призвести до локальних перегрівів або недостатнього нагріву сировини. Тривалість процесу сушіння, яка може варіюватися від 1 до 10 год. залежно від типу та вологості волоських горіхів, створює підвищене енергетичне навантаження, що призводить до збільшення витрат на електроенергію та обмежує економічну ефективність обладнання. Також конструкція шафи передбачає використання лотків, що потребують

регулярного очищення від залишків сировини. Недотримання цих процедур може призвести до зниження ефективності сушіння.

Сушильний комплекс «СВГ» (Рис. 1.10) розроблений для ефективного сушіння цілих волоських горіхів, що є важливим етапом у післязбиральній обробці. Однією з ключових переваг є використання шнекового механізму всередині резервуара, що забезпечує рівномірне перемішування сировини під час сушіння. Це сприяє досягненню однорідного рівня вологості [67].



Рисунок 1.10 - Сушильний комплекс «СВГ» для волоських горіхів

Конструкція передбачає наявність автономних резервуарів, що дозволяє здійснювати сушіння та завантаження сировини без зупинки роботи комплексу. Це підвищує загальну продуктивність і знижує час простою обладнання. Система енергозбереження, що включає калорифери, нагріті водяною системою, дозволяє використовувати різні джерела тепла, такі як дрова, газ або електричні котли.

Режими роботи сушильного комплексу можуть бути як ручними, так і автоматичними, що дозволяє налаштовувати процес сушіння відповідно до специфіки сировини.

Незважаючи на переваги даний сушильний комплекс «СВГ» має певні конструктивні та технологічні недоліки. Одним із таких є відсутність системи контролю температури та вологості в кожному резервуарі, що може призвести до нерівномірного сушіння, особливо при великих обсягах сировини.

Хоча система шнекового перемішування сприяє рівномірному сушінню, вона може бути схильна до зносу при обробці великих обсягів сировини, що потребує регулярного технічного обслуговування та заміни деталей. Відсутність автоматизованих систем очищення резервуарів може ускладнювати процес підтримки обладнання в належному стані, особливо при обробці сировини з високим вмістом залишків перикарпію.

Одним із основним недоліком даного комплексу є низька енергоефективність, що робить процес сушіння волоських горіхів енергоємним та затратним.

Проведений аналіз існуючих конструкцій обладнання для сушіння волоських горіхів дозволяє виділити їхні загальні недоліки, які впливають на ефективність технологічного процесу. Деякі машини мають недостатній контроль температури та вологості, нерівномірний розподіл тепла, що призводить до нерівномірного розподілу теплоносія та зниження якості матеріалу.

Крім того, дані сушарки характеризуються високими енергозатратами та підвищеним зносом рухомих елементів, що обумовлює необхідність регулярного технічного обслуговування. Відсутність зонального контролю температури та вологості також ускладнює отримання якісної продукції. Проведений аналіз машин показує, що конструктивні особливості сушильних камер і систем циркуляції повітря безпосередньо визначають ефективність та якість сушіння, рівномірність вологості та енергоефективність процесу, що є критично важливими показниками для промислового використання.

1.4. Методи інтенсифікації процесу сушіння

1.4.1. Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння

Інтенсифікація процесу сушіння сільськогосподарської продукції, у тому числі волоських горіхів, привертала увагу багатьох дослідників, оскільки саме ця операція визначає енергетичну ефективність післязбиральної доробки та якісні

характеристики готового продукту. За оцінками [68, 69], сушіння у традиційних конвективних установках супроводжується значними втратами теплової енергії, що становить до 30–40 % від загальних витрат, тому пошук шляхів інтенсифікації процесу є стратегічним завданням сучасного аграрного виробництва.

У дослідженнях [70] доведено, що одним із найефективніших методів інтенсифікації є оптимізація параметрів тепло- та масообміну. Зокрема, підвищення швидкості руху сушильного агента до оптимальних значень зменшує товщину прикордонного шару і прискорює дифузію вологи. Однак занадто високі швидкості можуть призводити до зростання енерговитрат, тому важливим напрямом сучасних досліджень є математичне моделювання процесів з урахуванням реологічних властивостей матеріалу.

В роботі [71] акцентується увага на доцільності комбінованих методів сушіння. Експериментальні дані показують, що поєднання конвективного та мікрохвильового нагріву дозволяє скоротити тривалість сушіння у 1,5–2 рази при збереженні високих органолептичних властивостей ядра. Подібних висновків дійшли й закордонні дослідники, які відзначають, що інфрачервоне випромінювання в поєднанні з традиційним нагрівом забезпечує рівномірний розподіл температури та мінімізацію локальних перегрівів [72].

Окремий напрям досліджень стосується вібраційного впливу. Як зазначають автори [32], введення коливальних рухів у процес сушіння створює умови для механічної активації, завдяки чому зменшується внутрішній опір міграції вологи. Це особливо актуально при сушінні волоських горіхів у шкаралупі, коли оболонка створює додатковий бар'єр. Вібраційні сушарки дозволяють підтримувати однорідність температурно-вологісного поля та зменшувати ризик утворення зон з підвищеною вологістю [73, 74, 75].

Не менш важливою є тенденція до використання енергоощадних технологій. У своїй монографії автори [76] наголошують на перспективності впровадження систем рекуперації тепла і теплових насосів у конструкцію сушильних агрегатів. Це дає змогу не лише інтенсифікувати процес, але й істотно

зменшити питомі витрати енергії. За даними [72, 77], застосування сонячних колекторів для попереднього підігріву повітря може скоротити використання традиційних енергоносіїв на 20–25 %.

Наукові дослідження автора [78] також підкреслюють роль автоматизованих систем управління сушильними установками. Використання сенсорів і програмованих контролерів для моніторингу вологості й температури в реальному часі забезпечує адаптивне регулювання режимів, що підвищує рівень енергетичної ефективності та стабільність якості продукції [72]. Такий підхід відповідає світовим трендам цифровізації агропромислового комплексу та розвитку «розумних» технологій.

Тому інтенсифікація сушіння є багатовекторним процесом, який поєднує оптимізацію параметрів тепло- і масообміну, застосування комбінованих та вібраційних методів, впровадження енергоощадних рішень і цифрових систем управління. Узагальнення результатів численних досліджень дозволяє стверджувати, що саме комплексний підхід є найбільш ефективним для забезпечення високої продуктивності сушіння при збереженні якісних характеристик волоських горіхів.

1.4.2. Застосування вібраційного впливу для інтенсифікації сушіння волоських горіхів

Волога, яку неможливо видалити з матеріалу механічними засобами, усувається шляхом сушіння, що є процесом випаровування, під час якого відбувається перехід вологи з рідкої або твердої фази у газоподібну. Для реалізації цього процесу необхідно безперервно підводити тепло до матеріалу, а швидкість і рівномірність випаровування залежать від характеру передавання теплової енергії. У реальних умовах має місце комбінована передача тепла теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням, однак при традиційних технологіях сушіння горіхів переважає саме конвективний механізм [79, 80, 81].

Конвективні сушарки широко використовуються у господарствах, проте вони мають істотні недоліки: нерівномірність процесу, надмірну тривалість, а також ризик перегріву ядра. В умовах, коли волоський горіх захищений твердою шкаралупою, волога виходить нерівномірно, що потребує багаторазового повторення циклу сушіння та знижує якість продукції [32, 82].

Застосування вібраційного впливу дозволяє інтенсифікувати процес сушіння за рахунок механічної активації. Постійне перемішування матеріалу у вібраційних камерах зменшує товщину прикордонного шару повітря та забезпечує кращу дифузію вологи. Дослідження [83] показали, що оптимальні параметри амплітуди і частоти коливань дають змогу скоротити тривалість сушіння на 20–25 % без негативного впливу на смакові та поживні властивості ядра. Подібні висновки отримані і закордонними вченими, які підкреслюють важливість механічної активації при сушінні продуктів із твердою оболонкою [84, 85].

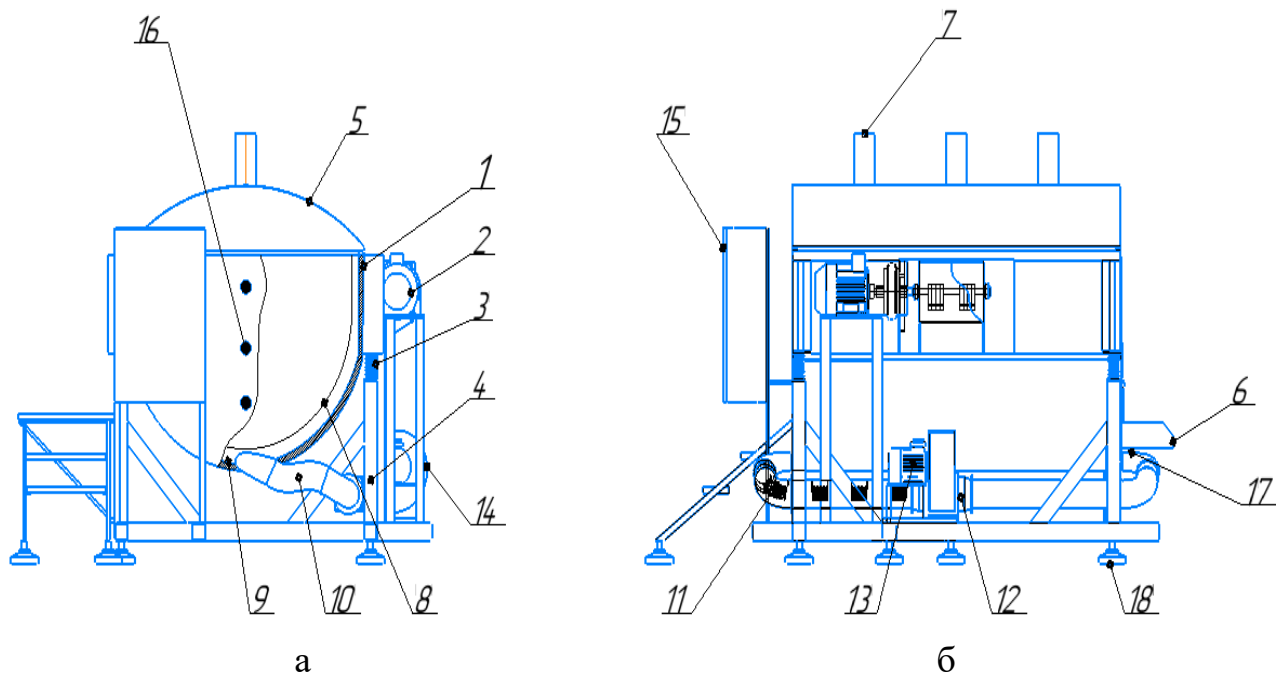
Важливою перевагою вібраційного сушіння є рівномірність нагрівання шару продукту. На відміну від класичних барабанних сушарок, у вібраційних установках мінімізується ризик утворення зон підвищеної вологості. За даними [86], вібрація забезпечує не лише стабільний масообмін, але й знижує енерговитрати на одиницю продукції завдяки скороченню циклу сушіння.

Перспективним напрямом є поєднання вібраційного впливу з інфрачервоним або мікрохвильовим нагрівом. Такі комбіновані установки створюють умови для внутрішнього та зовнішнього прогріву горіха, що дозволяє ще більше скоротити час сушіння та підвищити його енергоефективність. Згідно з [87], використання комбінованої технології скорочує витрати енергії на 15–20 % у порівнянні з традиційними методами. Подібні результати представлені у роботі [71], які показали доцільність мікрохвильово-конвективного сушіння для харчових продуктів із високим вмістом вологи.

Застосування вібраційного впливу для сушіння волоських горіхів є доцільним і технологічно обґрунтованим. Це дозволяє забезпечити швидке й рівномірне видалення вологи, знизити собівартість продукції та підвищити її

якісні характеристики. Подальші дослідження мають бути спрямовані на пошук оптимальних конструктивно-технологічних параметрів вібраційних сушарок і розроблення комбінованих енергоефективних систем [72, 88].

З урахуванням всіх недоліків розглянутих конструкцій машин для сушіння волоських горіхів нами пропонується розроблена конструктивна схема вібраційної машини для сушіння волоських горіхів (рис 1.11) [89, 90, 91, 92, 93].



а - вид спереду, б - вид збоку;

1 – теплоізовльована U-подібна сушильна камера; 2 – інерційний віброзбуджувач; 3 – пружини; 4 – рама; 5 – кришка; 6 – розвантажувальний лоток; 7 – повітропроводи; 8 – перфороване днище; 9 – піддон; 10 – лінія подачі нагрітого повітря; 11 – теплоелектронагрівачі; 12 – повітророзподільний пристрій; 13 – електродвигун; 14 – нагнітальний вентилятор; 15 – автоматична система керування; 16 – трьохрівневі датчики; 17 – датчик температури; 18 – віброопори

Рисунок 1.11 - Розроблена конструктивна схема дослідно-промислової моделі вібраційної машини для сушіння волоських горіхів

1.5. Висновки, мета, об'єкт, предмет та завдання дослідження

1. В результаті проведеного аналізу встановлено, що волоський горіх належить до стратегічно важливих і експортоорієнтованих плодових культур на світовому ринку, а його виробництво характеризується високою концентрацією у Китаї та США. Україна, попри сприятливі агрокліматичні умови, стикається з проблемами сортового оновлення та домінуванням дрібнотоварного виробництва, що знижує експортний потенціал.

2. Дослідження технології післязбиральної обробки горіхів показало, що провідне місце у формуванні якості та збереженні поживних властивостей займає операція сушіння. Саме вона визначає довговічність зберігання, мікробіологічну безпеку та товарний вигляд продукції.

3. Аналіз сучасних засобів сушіння виявив низку конструктивних і технологічних недоліків: нерівномірність прогрівання шару горіхів, підвищені енерговитрати, складність контролю температури й вологості, що обмежує ефективність промислових сушильних комплексів.

4. Встановлено, що шляхи інтенсифікації процесу сушіння полягають у поєднанні оптимізації параметрів тепло- і масообміну в застосуванні комбінованих методів, впровадженні енергоощадних технологій і автоматизованих систем контролю. Це забезпечує скорочення тривалості процесу та зменшення енергетичних витрат.

Мета дослідження: підвищення продуктивності, зменшення енерговитрат, збереження якості при сушінні волоських горіхів, шляхом розробки та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- на основі аналізу існуючих засобів для сушіння волоських горіхів, а також результатів теоретичних та експериментальних досліджень, розробити конструктивну схему і 3D - модель вібраційної машини для сушіння волоських горіхів;

- розробити математичну модель процесу сушіння з визначенням зміни температури ядра горіху в залежності від початкових умов і технологічних параметрів процесу;
- розробити методику та провести дослідження по визначенню фізико-механічних та теплофізичних характеристик волоських горіхів, а також зміни інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла в процесі сушіння;
- розробити та виготовити дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів;
- експериментально підтвердити доцільність застосування вібраційного впливу, як способу інтенсифікації процесу сушіння волоських горіхів;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження для встановлення раціональних параметрів роботи вібраційної машини;
- здійснити перевірку адекватності отриманої математичної моделі;
- здійснити виробничу апробацію дослідно-промислового зразка вібраційної машини для сушіння волоських горіхів та оцінити її економічну ефективність.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [54, 89, 90, 91, 92, 93].

1. Руткевич В.С., Дідик А.М. Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкаралупі. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* 2023. № 1 (317). С. 230-236. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>

2. Цуркан О.В., Спірін А.В., Твердохліб І.В., Дідик А.М. Обґрунтування способу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2024. № 2 (109). С. 5-11. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-21

3. Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.* 2024. №2 (333). С. 393-399. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333- 2- 61

4. Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спирін А.В., **Дідик А.М.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки». Свідоцтво № 128825 від 02.08. 2024; заяв. № с202405407 від 20.06. 2024.

5. Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спирін А.В., **Дідик А.М.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів». Свідоцтво № 130915 від 29.10. 2024; заяв. № с202408113 від 1.10. 2024.

6. Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спирін А.В., **Дідик А.М.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів». Свідоцтво № 130914 від 29.10. 2024; заяв. № с202408114 від 1.10. 2024.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ

2.1 Фактори, що впливають на інтенсивність процесу сушіння

2.1.1 Основні фактори: температура та швидкість сушильного агенту

Практично вся рослинна сільськогосподарська продукція під час післязбиральної обробки потребує проведення технологічної операції сушіння, не є винятком і волоські горіхи. Згідно нормативним вимогам [33] кінцева середня вологість волоського горіху має становити 10%. Із саду на пункт післязбиральної обробки горіх поступає зі значно більшою вологістю (30-50%), яка залежить від сорту, кліматичних умов під час збирання урожаю тощо.

Операція сушіння є найбільш енергозатратною з усіх технологічних операцій післязбиральної обробки рослинної продукції сільського господарства. У деяких випадках її доля може становити до 40-50% усіх енергозатрат технології. Тому підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є першочерговою задачею при плануванні та реалізації технологій післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції, в тому числі і волоських горіхів.

Основним критерієм енергетичної ефективності сушильного обладнання прийнято вважати [94,95] термічний коефіцієнт корисної дії, що являє собою відношення теплоти, яка витрачена на випаровування вологи з горіхів (її можна назвати корисно використаною теплотою q_k) до всієї теплоти (q_3), яку затрачено на процес зневоложення:

$$\eta_T = \frac{q_k}{q_3}, \quad (2.1)$$

Затрачена теплота в розрахунку на один кілограм атмосферного повітря в блоці ТЕН (теплоелектричний нагрівач), визначається співвідношенням [68]:

$$q_3 = c_p(t_1 - t_o), \quad (2.2)$$

де c_p – питома теплоємність повітря, Дж/кг⁰С ;

t_1 – температура сушильного агента на вході у вібраційну машину, ⁰С;

t_0 – температура повітря, що подається в блок ТЕН (температура атмосферного повітря), ⁰С.

Теплота, яка витрачається на випаровування на 1 кг вологи, віднесена до атмосферного повітря [95, 96]:

$$q_{\text{к}} = \frac{r(d_2 - d_1)}{1000}, \quad (2.3)$$

де d_1, d_2 – вологовміст сушильного агента відповідно на вході і виході із сушарки, $\frac{\text{кг}_\text{в}}{\text{кг}_\text{ср}}$;

r – питома теплота випаровування, Дж/кг .

Тоді вираз для термічного ККД сушарки можна записати :

$$\eta_{\text{т}} = r \frac{d_2 - d_1}{c_p(t_1 - t_0)} 10^{-3}, \quad (2.4)$$

Аналіз виразу (2.4) дозволяє зробити декілька висновків. Максимального значення ККД вібраційна машина буде досягати при найбільшій різниці вологовмісту сушильного агента на вході і виході сушарки, тобто коли вологовміст відпрацьованого сушильного агента досягне насичення: $d_2 = d_{\text{min}}$ (відносна вологість при цьому буде 100%), а його температура знизиться до значення $t_2 = t_{\text{min}}$.

Для конвективного способу сушіння, який ми використовуємо при сушінні горіхів, енергетичний ККД сушарки можна визначити із загальновідомого співвідношення [97,98]:

$$\eta_{\text{конв}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (2.5)$$

де t_2 – температура відпрацьованого сушильного агента, ⁰С.

Дане рівняння відображає суто теоретичний випадок, коли корисною вважається вся теплота, що виділяється теплоносієм в сушарці. Тому максимально можлива величина ККД (теоретична) визначається наступним співвідношенням:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{(t_1 - t_{\text{м}})}{(t_1 - t_0)} \quad (2.6)$$

де t_m - температура мокрого термометра, °C.

Температура сушильного агенту – початкова (t_1) і кінцева (t_2), неоднозначно впливають на термічний ККД сушарки. Відповідно співвідношенню (2.5) ККД збільшується при підвищенні t_1 . При цьому має збільшуватись швидкість сушіння і зменшуватись t_2 . Однак, при цьому збільшується і температура матеріалу, що знаходиться в сушарці. В нашому випадку - це волоські горіхи. Підвищення температури горіхів має свою межу. Адже при збільшенні температури ядра горіхів понад 36°C відбувається зменшення вмісту олії в ньому, що негативно впливає на показники якості [25]. При цьому зменшується ступінь насичення сушильного агенту, тобто зменшується різниця між d_1 і d_2 [99]. Також збільшується температура t_2 , що призводить до зменшення ККД.

Ще одним способом визначення енергетичної ефективності сушарки можуть бути питомі витрати енергії на одиницю вологи, що випаровується q_0 , або висушеного матеріалу q_m , що може бути кількісно оцінено співвідношенням [95]:

$$q_0 = \frac{c_p(t_1 - t_0)}{(d_2 - d_1)10^{-3}} = \frac{I_1 - I_0}{(d_2 - d_1)10^{-3}}, \quad (2.7)$$

де I_1, I_0 – ентальпія сушильного агенту на вході до сушильної камери і на вході в блок ТЕН, відповідно, Дж.

Величина $\Delta d = d_2 - d_1$ в знаменнику (2.7) визначає кількість випаруваної вологи і згідно [95] може бути визначена із співвідношення:

$$\Delta d = \frac{c_p(t_1 - t_2) - \sum Q_{\text{втр}}}{f(t, r) + r_1} \quad (2.8)$$

В формулі (2.8) вираз $\sum Q_{\text{втр}}$ означає непродуктивні витрати теплової енергії, простіше кажучи втрати. Це енергія, яка витрачається на нагрів корпусу сушарки, елементів конструкції, тепло, яке виходить з відпрацьованим сушильним агентом, з готовою продукцією тощо. Функція $f(t, r)$ залежить від співвідношення температури сушильного агенту на вході та виході із сушарки та властивостей матеріалу, особливо швидкості випаровування вологи. Вираз r_1 відображає кількість теплоти, що сприймає одиниця вологи (1 кг) в сушарці. Всі

ці три величини залежать від індивідуальних особливостей сушарки та матеріалу, і можуть бути розраховані для кожного конкретного випадку процесу сушіння.

Аналіз залежностей для визначення термічного ККД сушарки і питомих затрат на випаровування одиниці вологи показує, що енергетична ефективність сушарки для волоських горіхів залежить від їх теплофізичних характеристик та технологічних параметрів процесу сушіння. Останні включають в себе температуру сушильного агенту на вході та виході із сушарки, його швидкість, інтенсивність видалення вологи і експозицію сушіння. Інтенсивність видалення вологи значною мірою залежить від умов теплообміну між теплоносієм та матеріалом. Дієвим шляхом інтенсифікації процесу сушіння є застосування вібраційного впливу на шар матеріалу. Це дозволяє зменшити аеродинамічний опір товстого шару матеріалу, підвищити швидкість обтікання горіхів потоком сушильного агенту. Далі ми покажемо, що інтенсивність теплообміну, а отже, і енергетична ефективність сушарки для волоських горіхів, безпосередньо залежить від швидкості сушильного агенту – чим більша швидкість, тим вищий коефіцієнт теплообміну між сушильним агентом і матеріалом.

Про роль температури сушильного агенту можна зробити висновки з виразів (2.4 - 2.6). В цих формулах всюди присутня різниця температур сушильного агенту на вході і виході із сушарки, на вході в сушарку та в блок ТЕН. Чим більша ця різниця температур, тим, відповідно, і більший термічний ККД сушарки. Самий простий спосіб досягти цього – підвищувати температуру сушильного агенту на вході в сушарку. Але існують певні обмеження, особливо до термолабільних матеріалів, до яких відноситься і волоський горіх. Якщо підвищити температуру матеріалу вище гранично допустимої, почнеться різке зниження якості готового продукту. Для волоського горіху це, в першу чергу, зниження олійності ядра. Далі буде розглянутий спосіб визначення температури матеріалу в залежності від технологічних параметрів процесу сушіння, в тому числі і від початкової температури сушильного агенту.

2.1.2 Фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалу

Кожен матеріал як об'єкт сушіння, має свої, тільки йому притаманні структурно-механічні, фізико-механічні, біологічні властивості, які, до того ж змінюються під час процесу сушіння.

До основних властивостей матеріалу як об'єкту сушіння, відносяться: масові, розмірні, вологісні, механічні, аеродинамічні, теплофізичні характеристики. Для волоського горіху, як об'єкту сушіння, найбільший інтерес мають розмірні, масові, та, особливо, теплофізичні характеристики.

Перш за все нас цікавлять розмірні характеристики волоських горіхів, адже форма і розмір об'єкта сушіння суттєво впливає на характер перебігу самого процесу. Перш за все, при моделюванні процесів теплообміну прийнято всі об'єкти досліджень класифікувати за формою. В теорії теплообміну розглядаються об'єкти трьох класичних форм: пластина, циліндр і куля. За своєю формою більшість сортів волоських горіхів можуть розглядатись як куля. Це зовнішня форма шкаралупи, всередині якої знаходиться ядро з перетинками. Ядро горіха практично повністю повторює форму шкаралупи, тобто також є кулею, але меншого діаметру. Для адекватного моделювання процесів теплообміну всередині горіха, доцільно буде представити його як складну систему «куля в сфері», де зовнішньою кулею з визначеною товщиною стінки є шкаралупа горіха, а внутрішньою - ядро горіха. Така форма представлення волоського горіха дає змогу адекватно моделювати розподіл температури матеріалу в просторі і часі, визначати закономірності перебігу процесу сушіння, визначати його раціональні параметри.

Іншим важливим фізико-механічним параметром горіха є його щільність. Щільність горіхів буде використана при створенні математичної моделі їх сушіння у вібраційній машині.

Щільність горіха визначається, як відношення його маси до об'єму в якому він знаходиться, визначається за формулою:

$$\rho_d = \frac{m_r}{V_r}, \quad (2.9)$$

В даному випадку нас цікавить саме щільність, тобто відношення маси одного горіха до об'єму цього самого одного горіха. Якщо розглядати шар або декілька шарів горіхів, які знаходяться в робочій камері сушарки, то можна говорити про об'ємну масу або насипну масу, тому що об'єм, який горіхи займають в робочій камері сушарки не дорівнює сумі об'ємів всіх горіхів, які там знаходяться. Методи визначення щільності волоського горіха, його складових, об'ємної маси та інших механічних властивостей волоських горіхів будуть висвітлені в третьому розділі, а конкретні значення цих параметрів – у четвертому розділі. Потрібно зауважити, що щільність волоського горіху залежить від його фізико-біологічних властивостей (розмір, сорт, термін зрілості тощо), а також від вологості горіху. Це впливає із залежності (2.9), адже чим менша вологість горіха, тим менша його маса і, відповідно, його щільність. Що стосується методів визначення щільності горіха та його складових, частково ці питання вже були досліджені [98], а більш глибоко ці питання будуть докладно розглянуті в наступних розділах роботи.

Теплофізичні властивості матеріалів в процесі сушіння відіграють значно більшу роль ніж, наприклад, фізико-механічні показники. Адже від їх конкретного значення та характеру зміни під час перебігу процесу сушіння залежить, в значній мірі, енергетична ефективність процесу сушіння. У більшості випадків під час моделювання процесу сушіння потрібно знати величини та характер змін трьох основних теплофізичних параметрів: теплоємність c (Дж/кг⁰С), теплопровідність λ (Вт/м⁰С) та температуропровідність a (м²/с). Ці величини пов'язані між собою співвідношенням:

$$c = \frac{\lambda}{a\rho}, \quad (2.10)$$

де ρ – густина матеріалу, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Методи визначення теплофізичних характеристик матеріалу, особливо необхідних для вивчення процесів сушіння рослинної продукції, детально

досліджені в роботі [100]. Ми коротко зупинимось на теоретичних аспектах визначення теплофізичних характеристик волоського горіха.

Визначення теплофізичних характеристик рослинних матеріалів, в тому числі волоських горіхів, значно відрізняється від аналогічних методів, наприклад, для металів або твердих будівельних матеріалів. Для останніх більш характерним є дослідження в широкому діапазоні саме температур, в той час, коли для рослинних матеріалів дослідження проводяться для невеликого діапазону температур і значного інтервалу вологості матеріалу. Адже, наприклад, волоський горіх поступає на сушіння з вологістю приблизно 30%, його потрібно висушити до 10% вологості, при цьому різниця температур сушильного агента на вході і виході із сушарки, як правило, не перевищує 15-17 °С. Аналіз попередніх досліджень показує, що рослинні матеріали мають свої особливості при визначенні теплофізичних характеристик. Наприклад, дослідження [100] свідчать, що теплофізичні характеристики рослинних матеріалів значною мірою залежать від ступеня їх стиглості.

Існує чимало методів визначення теплофізичних характеристик матеріалів. Ми скористаємось методом, представленим в роботі [75]. Теоретичні основи методу визначення теплофізичних характеристик матеріалу ґрунтуються на закономірностях нестационарного нагріву двох напівобмежених стержнів, в місці дотику яких знаходиться джерело тепла постійної потужності.

Теоретичною основою методу є розв'язок та аналіз рівняння теплопровідності [75]:

$$-\frac{dt(x,\tau)}{d\tau} = a \frac{d^2t(x,\tau)}{dx^2}, \quad (2.11)$$

з граничними умовами:

$$t(x, 0) = t_0 = const, \\ q(0, \tau) = q_0 = const, \quad \frac{dt(\pm\infty, \tau)}{dx} = 0, \quad \lambda \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x=0} = q_0. \quad (2.12)$$

Розв'язок рівняння (2.11) з граничними умовами (2.12) має вигляд:

$$\Delta t_x = t(x, \tau) - t_0 = 2 \frac{q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right), \quad (2.13)$$

Підставивши $x = 0$ в формулі (2.13), отримаємо вираз для температури нагрівача при $\tau = 0$:

$$\Delta t_n = t_n - t_0 = 1,1284 q_0 \lambda^{-1} \sqrt{a\tau}, \quad (2.14)$$

оскільки $\operatorname{ierfc} 0 = 0,5642$

Поділивши (2.13) на (2.14), отримаємо [98]:

$$0,5642 \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n} = \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right), \quad (2.15)$$

З виразів (2.14) і (2.15) аналітично можна визначити a і λ , однак більш простим і зручним є графоаналітичний метод розв'язання. Цей метод докладно викладений в роботі [98], рівно як і опис лабораторної установки для визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів, і методики, за якою проводились досліді по визначенню цих характеристик.

Методика проведення дослідів по визначенню теплофізичних характеристик волоських горіхів і результати цих дослідів представлені, відповідно, в розділах 3 і 4.

2.2 Граничні умови перебігу процесу тепломасообміну

2.2.1 Характеристика всіх граничних умов

Метою теоретичних досліджень даної роботи є створення математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині. Для створення математичної моделі необхідно розв'язати рівняння нестационарної теплопровідності з відповідними початковими і граничними умовами. Це дасть змогу отримати єдиний конкретний для даних умов розв'язок, тому що диференційне рівняння теплопровідності має нескінченну кількість розв'язків. Для виділення єдиного розв'язку цього рівняння, відповідного єдиному явищу теплопровідності, мають бути задані наступні параметри:

1. Геометричні розміри і форма тіла, а також час τ для нестационарного процесу. Вище ми вже відмічали, що волоський горіх як об'єкт процесу сушіння, має геометричну модель «куля в сфері», де більшою кулею є шкаралупа горіха, а меншою – його ядро. Час, або експозиція сушіння, буде визначений теоретичним та експериментальним шляхами в подальших дослідженнях.

2. Фізико-механічні та теплофізичні властивості матеріалу. Про них було сказано в попередньому підрозділі. Їхні конкретні значення будуть визначені в результаті лабораторних досліджень.

3. Закон розподілу внутрішніх джерел тепла. Про внутрішні джерела тепла (в нашому випадку – від'ємні внутрішні джерела тепла) мова піде в цьому ж розділі далі.

4. Початкові умови (ПУ), що задають розподіл температури в матеріалі на початку процесу сушіння (при $\tau=0$), і граничні умови (ГУ), які задають умови теплообміну на межі матеріалу і теплоносія.

Перед початком розрахунку процесу нестационарної теплопровідності необхідна інформація про розподіл температури в об'ємі тіла в деякий момент часу, що вважається початком відліку або початковим моментом часу (момент часу $\tau = 0$). Таким чином, має бути задана функція:

$$T(x_i, \tau = 0) = f_0(x_i) \quad \text{або} \quad T(x_i, 0) = f_0(x_i), \quad (2.16)$$

де x_i – система координат.

У розрахунках теплообміну застосовують граничні умови чотирьох типів, які ще називають родами. Граничні умови теплообміну потрібно задавати як на зовнішній поверхні тіла, так і при розташуванні межі розрахункової області усередині тіла, на внутрішній поверхні. Граничні умови першого і другого роду можуть бути як зовнішніми так і внутрішніми, граничні умови третього роду – лише зовнішні граничні умови, граничні умови четвертого роду – лише внутрішні.

Граничні умови 1-го роду

Температурний режим на поверхні тіла визначається як функціональна залежність від просторових координат та часу [36]:

$$t_c = f(x, y, z, \tau), \quad (2.17)$$

де t_c – температура поверхні тіла (температура стінки);

x, y, z – координати поверхні тіла.

Окремий випадок, якщо температура тіла постійна в часі, то:

$$t_c = \text{const}. \quad (2.18)$$

Граничні умови 2-го роду

Розподіл густини теплового потоку на поверхні тіла задається у вигляді функціональної залежності від просторових координат та часу [36]:

$$q_n = f(x, y, z, \tau), \quad (2.19)$$

де q_n – щільність теплового потоку на поверхні тіла.

В окремому випадку при постійному тепловому потоці по поверхні і в часі умова запишеться:

$$q_n = q_0 = \text{const}. \quad (2.20)$$

Приклад: нагрів металевих деталей у високотемпературних печах.

Граничні умови 3-го роду

Задається температура навколишнього середовища та відповідний закон теплообміну між її середовищем і поверхнею тіла. Така умова визначає характер теплової взаємодії під час нагрівання чи охолодження твердого тіла. Теплообмін між поверхнею тіла та середовищем описується узагальненим законом Ньютона–Ріхмана [36].

$$q = \alpha(t_c - t_{nc}), \quad (2.21)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²К.

Виходячи з принципу збереження енергії для поверхні тіла, доцільно застосувати закон Фур'є [36]:

$$\alpha(t_c - t_{nc}) = -\lambda \left(\frac{dt}{dn} \right)_c. \quad (2.22)$$

Індекс «С» позначає поверхню тіла. Спираючись на умову балансу теплових потоків, що відводяться від поверхні та надходять із внутрішніх шарів матеріалу (а при сушінні – підводяться до поверхні та поглинаються внутрішніми ендотермічними процесами), граничну умову третього роду можна подати в такій формі:

$$\left(\frac{dt}{dn} \right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_{nc} - t_c). \quad (2.23)$$

Граничні умови 4-го роду

Вони описують умови теплообміну між тілами, що мають різні коефіцієнти теплопровідності та перебувають в умовах ідеального теплового контакту, за якого температури дотичних поверхонь збігаються [36]:

$$\lambda_1 \left(\frac{dt_1}{dn} \right)_c = \lambda_2 \left(\frac{dt_2}{dn} \right)_c. \quad (2.24)$$

В нашому випадку теплообмін відбувається згідно граничних умов третього роду. Аналіз формул (2.18-2.24) показує, що саме умови третього роду є найбільш складними як за реальними умовами теплообміну так і математичним апаратом, що їх описує. Адже у вібраційній машині, де відбувається процес сушіння волоських горіхів, матеріал і сушильний агент знаходяться в постійному русі. Окрім того, параметри матеріалу (вологість, температура) постійно змінюються із збільшенням експозиції сушіння. Такі складні умови теплообміну в даній сушарці і обумовлюють використання граничних умов третього роду для опису взаємодії матеріалу і сушильного агенту.

2.3 Математична модель нагрівання в процесі сушіння волоських горіхів

2.3.1 Аналіз відомих математичних моделей теплопровідності сферичних тіл із внутрішніми джерелами тепла

Дослідження процесів нестационарної теплопровідності в твердих тілах із внутрішньою генерацією або поглинанням тепла становить основу сучасної теплофізики та термодинаміки неперервних середовищ. Розроблення моделей, що адекватно описують нестационарний розподіл температури в багат шарових структурах, має важливе значення для енергетики, аграрної інженерії, біомедичних і харчових технологій, де процеси нагріву, сушіння чи дегідратації супроводжуються складними внутрішніми тепловими ефектами.

Класичні аналітичні основи теорії нестационарної теплопровідності сформовано у працях [101, 102]. У цих роботах систематизовано методи розв'язання рівняння теплопровідності для тіл різної геометрії, зокрема суцільних сферичних, циліндричних і плоских, при наявності внутрішніх джерел тепла. Розглядалися процеси з наявністю позитивних внутрішніх джерел тепла. Автори використовували метод розділення змінних, перетворення Лапласа та функції Гріна для опису нестационарних процесів, а також розглядали випадки просторової та часової залежності інтенсивності джерела.

Розвиток аналітичних моделей теплопровідності з часово-залежними внутрішніми джерелами представлено у дослідженнях [103]. Авторами розв'язано рівняння теплопровідності для сферичного тіла з експоненційним джерелом тепла, що змінюється у часі. Однак розглянутий випадок передбачає позитивну генерацію енергії (тепловиділення), тоді як для процесів сушіння біологічних матеріалів характерним є протилежний — негативний енергетичний потік, тобто внутрішнє охолодження.

У роботі [97] висвітлені методи аналізу теплопередачі, в тому числі використання ефективних теплових властивостей і застосування цих принципів до вирішення реальних інженерних задач. В тому числі обґрунтовано механізми

теплоперенесення у пористих середовищах, де фазові перетворення (випаровування вологи, сорбція) виступають джерелом виділення або поглинання тепла. Автор довів, що при моделюванні таких процесів доцільно враховувати внутрішні джерела тепла змінної інтенсивності, які мають не лише просторову, а й часову залежність. Його дослідження були присвячені вивченню процесів перенесення тепла саме у штучних пористих середовищах.

Вагомий внесок у розвиток методів математичного моделювання теплових процесів у багатошарових тілах зроблені в роботах [104] і [105]. У цих працях систематизовано аналітичні рішення рівнянь теплопровідності для тіл типу «ядро-оболонка», що дозволяє враховувати неоднорідність теплофізичних властивостей та різні граничні умови — II та III роду. Ці підходи стали основою для побудови сучасних моделей теплових процесів у матеріалах та машинах, що використовуються в енергетиці.

Серед сучасних досліджень, що поєднують чисельне та аналітичне моделювання, заслуговують на увагу роботи [106] і [107], де вивчено нестационарне теплоперенесення у пористих середовищах з внутрішніми джерелами експоненційного типу, що виділяють або поглинають тепло. Проте ці моделі розроблені для однорідних середовищ і не враховують геометричну та структурну неоднорідність, характерну для біологічних об'єктів типу «ядро-шкаралупа».

В роботі [108] розглянуті питання нестационарної теплопровідності, в тому числі для тіл, які містять внутрішні джерела тепла. Були розглянуті процеси для плоскої стінки та циліндричної труби з постійними внутрішніми джерелами тепла.

Узагальнюючи результати попередніх досліджень, можна зробити висновок, що у науковій літературі відсутні аналітичні рішення рівняння нестационарної теплопровідності для тіла типу «куля в сфері» з від'ємними експоненційними внутрішніми джерелами тепла. Саме тому у даній роботі вперше запропоновано модифіковану математичну модель, яка враховує внутрішні енергетичні втрати у процесі сушіння волоських горіхів, описує

неоднорідну структуру біологічного об'єкту (ядро-шкаралупа) та дозволяє аналітично визначати просторово-часовий розподіл температури у внутрішніх шарах продукту.

2.3.2 Рівняння нестационарної теплопровідності

При реалізації процесу сушіння волоських горіхів важливе значення має раціональний вибір технологічних параметрів, зокрема експозиції сушіння, температури та швидкості сушильного агенту, а у випадку використання вібраційної машини - величини вібраційного впливу на сушильну камеру і, відповідно, на шар матеріалу в ній. Ці фактори впливають як на інтенсивність процесу сушіння, тобто його енергоефективність, так і на якість готового продукту. Кожен з цих факторів має специфічні особливості впливу на перебіг протікання процесу сушіння, але для волоського горіху найбільш важливим є температура сушильного агенту. Адже волоські горіхи багаті на олії, які при високих температурах стають згірклими і негативно впливають на смак. Тому для горіхів раціональною є температура ядра близько 36°C, і ні в якому разі вона не може перевищувати 38°C [109]. Звичайно, це рекомендації для температури ядра горіха, оскільки температура шкаралупи і самого теплоносія може бути більшою.

В процесі сушіння вологого матеріалу існує рівновага між кількістю вологи, яка надходить з внутрішніх шарів матеріалу, та вологою, що випаровується з поверхні матеріалу. Ця закономірність описується рівнянням [36]:

$$a_m \rho_0 (\nabla U + \delta \nabla \vartheta) = \frac{\alpha}{r} (t - \vartheta) \quad (2.25)$$

де a_m – коефіцієнт дифузії вологи, м²/с;

ρ_0 – щільність абсолютно сухої частини матеріалу, кг/м³;

δ – термоградієнтний коефіцієнт;

∇U – градієнт вологовмісту;

$\nabla \vartheta$ – градієнт температури матеріалу;

α – коефіцієнт теплообміну, Вт/м² °С;

r – прихована теплота випаровування води, кДж/кг;

t – температура сушильного агента, °С;

ϑ – температура поверхні матеріалу, °С.

Повний аналіз рівняння (2.25) ми проведемо далі, а поки що зазначимо, що для збільшення швидкості випаровування води є два основних шляхи. Перший – це збільшення різниці температур матеріалу і сушильного агента, тобто підвищення його температури на вході в сушарку. Другий шлях – це збільшення коефіцієнта теплообміну, тобто інтенсифікація процесу сушіння, наприклад, шляхом застосування вібраційної дії на шар матеріалу. Саме такий метод інтенсифікації процесу сушіння застосовується у вібраційній машині [85].

Для визначення раціональних параметрів процесу сушіння потрібно перш за все знати розподіл температури матеріалу в просторі і часі. Для цього потрібно розв'язати рівняння нестационарної теплопровідності з відповідними початковими і граничними умовами.

В загальному вигляді нестационарне рівняння теплопровідності має вигляд [36]:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{\Gamma}{r} \cdot \frac{dt}{dr} \right) \mp \frac{q_v}{c \cdot \rho}, \quad (2.26)$$

де r – поточна координата, м;

τ – експозиція сушіння, с;

a – коефіцієнт температуропровідності м²/с;

Γ – число, яке характеризує форму матеріалу: для пластини $\Gamma=0$; для циліндра $\Gamma=1$; для кулі $\Gamma=2$ [24].

c – теплоємність матеріалу, Дж/кг°С;

ρ – щільність матеріалу, кг/м³;

q_v – інтенсивність внутрішніх джерел тепла, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Раніше ми розглядали геометричні властивості волоських горіхів і прийняли його форму як «куля в сфері». Зовнішня сфера (з більшим діаметром) –

це шкаралупа, відповідно внутрішня сфера – це ядро горіха. Це означає, що в рівнянні (2.26) для нашого випадку $\Gamma = 2$ [36].

2.3.3 Внутрішні негативні джерела тепла

В реальних сушильних установках часто використовуються системи з джерелами тепла. Джерела тепла можуть бути локалізованими або рівномірно розподілятися всередині об'єму тіла. Важливим питанням є проведення розрахунку температурних полів в таких системах. При дослідженні переносу тепла в таких випадках важливо знати інтенсивність об'ємного виділення (поглинання) тепла, яке кількісно характеризується потужністю внутрішніх джерел тепла q_v , Вт/м³. Якщо величина q_v додатна, то в тілі є додатні джерела тепла. Від'ємні значення q_v означають, що мають місце від'ємні джерела (стоки) тепла.

В рівнянні (2.26) перед виразом $\frac{q_v}{c \cdot \rho}$ стоїть знак \mp . Знак $+$ означає, що в системі наявні позитивні джерела тепла, тобто при перебігу процесу теплообміну в системі виділяється додаткове тепло. Це може мати місце, наприклад, при хімічних реакціях з виділенням тепла.

Під час процесу сушіння теплова енергія, яка поступає до матеріалу від сушильного агенту, витрачається на прогрів сухої частини матеріалу (так званий скелет матеріалу), вологи та її випаровування. В ряді досліджень, наприклад [78], це тепло класифікується як від'ємне (негативне) внутрішнє джерело тепла і відмічається, що інтенсивність цього джерела зменшується в часі за експоненціальним законом.

Отже, можна сказати, що в процесі сушіння функціонує від'ємне джерело тепла з інтенсивністю:

$$q = q_0 \cdot \exp(-k_1 \tau), \quad (2.27)$$

де q_0 – інтенсивність негативного внутрішнього джерела теплоти в момент часу $\tau = 0$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$;

τ – експозиція сушіння, с;

k_1 – емпіричний коефіцієнт, який характеризує швидкість зміни інтенсивності від’ємного внутрішнього джерела тепла, 1/с.

Під час процесу сушіння тепло витрачається на прогрівання сушарки, матеріалу, випаровування води тощо. При стабільному перебігу процесу, тобто при постійних параметрах, кількість тепла, що віддається в навколишнє середовище з вихідним теплоносієм, яке іде на прогрів самої сушарки, залишається також практично постійним.

Але змінюється кількість тепла, яке поглинається самим матеріалом. На початку процесу сушіння тепло витрачається на нагрів сухої речовини горіха, нагрів та випаровування води. При збільшенні експозиції сушіння кількість тепла, що поглинається матеріалом, зменшується. Кількість тепла, яке поглинається сухою масою горіха, залишається практично постійним, а змінюється кількість тепла, що витрачається на випаровування води з матеріалу. Можна припустити, що потужність негативних внутрішніх джерел тепла еквівалентна кількості води, яка міститься у матеріалі.

Виходячи з цих міркувань, можна визначити коефіцієнт k_1 , який характеризує зміну інтенсивності внутрішніх джерел тепла. Прийmemo, що в момент часу τ_1 інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла дорівнює q_{τ_1} , а в момент часу τ_2 - відповідно q_{τ_2} . Інтенсивність внутрішніх джерел тепла пропорційна вологовмісту матеріалу, тобто:

$$\frac{q\tau_1}{q\tau_2} = \frac{q_0 \exp(-k_1\tau_1)}{q_0 \exp(-k_1\tau_2)} = \frac{\exp(-k_1\tau_1)}{\exp(-k_1\tau_2)} = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.28)$$

З виразу (2.28) можна отримати рівняння для визначення коефіцієнта k_1 :

$$k_1 = \frac{\ln \frac{U\tau_1}{U\tau_2}}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (2.29)$$

Коефіцієнт k_1 залежить від декількох факторів, зокрема від теплофізичних властивостей матеріалу, технологічних параметрів процесу, серед яких найбільш значущими є температура і швидкість сушильного агента, а також параметрів вібраційного впливу на шар матеріалу.

2.3.4 Основи теорії подібності в процесах сушіння

При розрахунку і проектуванні теплообмінного обладнання, в тому числі сушарок, як правило, потрібно розрахувати тепловий потік при конвективній тепловіддачі від теплоносія (сушильного агенту) до матеріалу або, навпаки, від матеріалу до теплоносія (в процесах охолодження). В цьому випадку тепловий потік розраховують за законом тепловіддачі або законом Ньютона [36]:

$$Q = \alpha(t_{ca} - t_m)F, \quad (2.30)$$

де Q – тепловий потік, Вт;

α – середній коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$;

t_{ca} і t_m – температура сушильного агенту і матеріалу, відповідно $^\circ\text{C}$;

F – площа поверхні теплообміну, м^2 .

В більшості випадків при визначених параметрах процесу задача зводиться до визначення коефіцієнта тепловіддачі. Проте, для складних систем теплообміну необхідно виконати безліч експериментів, оскільки коефіцієнт тепловіддачі залежить, в загальному випадку, від координат, швидкості, температури, фізичних властивостей середовища тощо.

Для зменшення числа незалежних змінних була розроблена теорія подібності. Теорія подібності також дає правила моделювання і дозволяє розповсюдити результати обмеженого числа експериментів на групу подібних явищ. Теорія базується на трьох положеннях :

1. Подібні процеси повинні мати однакову фізичну природу.
2. Повинна виконуватися подібність умов однозначності, а саме: геометрична подібність, кінематична подібність (подібність швидкостей), динамічна подібність (подібність сил), теплова подібність (подібність теплових потоків).
3. У моделі і об'єкті моделювання (зразку) визначальні критерії мають бути рівні. В цьому випадку рівні і критерії, які визначаються.

Критерієм є безрозмірний комплекс, який характеризує відношення фізичних ефектів, але не є цим відношенням. Іншими словами, критерій є мірою відношення фізичних ефектів.

В загальній теорії і практиці теплопередачі, в тому числі і при дослідженні процесів сушіння, використовують наступні критерії.

Критерій Нуссельта, який характеризує відношення інтенсивності конвективного теплового потоку (α) до інтенсивності кондуктивного теплообміну в шарі плинного середовища поблизу матеріалу (λ_f/R_0).

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda_{ca}/R_0}$$

де R_0 – характерний розмір об'єкта сушіння.

Критерій Фур'є $F_0 = a \cdot \tau / R^2$. Він характеризує зв'язок між фізико-механічними властивостями тіла та швидкістю зміни температурного поля в якому воно знаходиться.

Критерій Померанцева $P_0 = \frac{q_0 R^2}{\lambda(t_0 - g_0)}$. Характеризує зв'язок між інтенсивністю внутрішніх джерел тепла та параметрами нестационарного температурного поля.

Критерій Біо $Bi = HR$. Характеризує співвідношення конвективного та кондуктивного теплообміну.

Критерій Предводитєльєва $Pd = \left| \frac{dT_c}{dF_0} \right|_{\max}$ (в загальному вигляді), а в нашому

випадку $Pd = \frac{kR^2}{a}$. Він характеризує співвідношення температурних характеристик сушильного агента та навколишнього середовища.

Критерій Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot R_0}{\nu}$ характеризує тип течії сушильного агента, де V - швидкість сушильного агента, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

За значенням критерію Re визначають режим течії сушильного агента при вимушеній конвекції.

Ці загальноприйняті критерії будуть використані при створенні математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині.

2.3.5 Рішення нестационарного рівняння теплопровідності для випадку сушіння волоських горіхів у вібраційній машині

При дослідженні процесу сушіння потрібно зважати на те, що температура сушильного агенту завжди більше температури матеріалу. Різниця між цими температурами максимальна на початку процесу і зменшується з часом. Наші попередні досліді, а також дослідження інших авторів [125, 126] дозволили встановити що різниця між температурою сушильного агенту і температурою матеріалу в момент часу τ можна виразити так:

$$\Delta t_{\tau} = (t_0 - \vartheta_0) \exp(-k_2 \tau) \quad (2.31)$$

де Δt_{τ} – різниця температури сушильного агенту і матеріалу в момент часу τ ;

t_0 – температура сушильного агенту в момент часу $\tau = 0$;

ϑ_0 – температура матеріалу в момент часу $\tau = 0$;

τ – експозиція процесу сушіння;

k_2 – емпіричний коефіцієнт що характеризує швидкість нагріву матеріалу.

Коефіцієнт k_2 характеризує швидкість нагрівання матеріалу. Чим більше його значення, тим швидше нагрівається матеріал, і навпаки. Цей коефіцієнт залежить від властивостей матеріалу (форма зв'язку вологи з матеріалом, його фізико-механічні та теплофізичні характеристики) і параметрів процесу. Коефіцієнт k_2 визначається в результаті експериментальних досліджень.

Параметри процесу сушіння залежать від багатьох факторів, в тому числі геометричних характеристик матеріалу, тобто його розмірів і форми. В теорії теплопередачі розглядаються три класичні фігури - пластина, циліндр і куля. Зрештою, при дослідженнях тіло будь-якої форми розглядають як одну з цих геометричних фігур. Волоський горіх можна розглядати як кулю, але не звичайну, а складену як «куля в сфері», де зовнішня куля - це шкаралупа радіусом R і внутрішня куля – це ядро радіусом r_1 .

В подальшому ми будемо використовувати співвідношення цих радіусів. За даними морфологічних досліджень для більшості сортів волоських горіхів воно становить:

$$r^* = \frac{r_1}{R} = 0,9 \quad (2.32)$$

Для отримання продукту високої якості після проходження горіхом процесу сушіння, необхідно, щоб температура ядра горіха не перевищувала гранично допустиму температуру t_{mp} . Як ми уже зазначали, для більшості сортів волоських горіхів ця величина становить 36-38°C.

Тому з цієї точки зору нас цікавить розподіл температури горіха в часі і просторі на протязі процесу сушіння.

Вихідними виразами для вирішення поставленого завдання, тобто, знаходження розподілу температури в горіхові по радіусу і по часу є наступні умови.

Рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right] - \frac{q_0}{c\rho} \exp(-k_1 \tau) \quad (2.33)$$

Початкова умова:

$$\vartheta(r, 0) = \vartheta_0 \quad (2.34)$$

Гранична умова:

$$\left[\frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} \right]_{r=R} = H(t_0 - \vartheta_0) \exp(-k_2 \tau) \quad (2.35)$$

Умова симетрії:

$$\left[\frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} \right]_{r=0} = 0 \quad (2.36)$$

В цих рівняннях прийняті наступні позначення:

$\vartheta(r, \tau)$ – температура ядра горіха у будь-якій точці на радіусі r в момент часу τ ;

a, c, γ – відповідно температуропровідність, теплоємність і щільність матеріалу;

$H = \frac{\alpha}{\lambda}$, де α – коефіцієнт теплообміну між матеріалом і сушильним агентом;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Рівняння (2.35) визначає особливості перебігу процесу на границях тіла, тобто граничні умови. Взагалі в теорії теплопередачі розрізняють чотири види (їх частіше називають родами) граничних умов. В нашому випадку це граничні умови третього роду, вони полягають у заданні температури навколишнього середовища, тобто температури сушильного агента та інтенсивності теплообміну на поверхні тіла.

Розв'язок рівняння (2.33) будемо вести операційним методом при наступних припущеннях.

Теплофізичні характеристики матеріалу будемо вважати постійними на протязі усього часу, процесу сушіння. Звичайно, вони залежать від вологості матеріалу та температури, але ці параметри в нашому випадку змінюються в доволі вузьких межах, тому з певним допущенням будемо вважати теплофізичні характеристики матеріалу постійними. Також приймемо припущення, що коефіцієнт теплообміну між матеріалом та сушильним агентом залишається постійним протягом всього часу процесу сушіння. Коефіцієнт теплообміну також залежить від температури сушильного агента і матеріалу, але діапазон зміни температур досить незначний, і тому без значної похибки в результатах можна прийняти припущення про постійність коефіцієнта теплообміну.

Декілька слів про операційний метод вирішення диференціальних рівнянь. Прочитуємо, для прикладу, перший абзац роботи [110].

Ідея операційного числення полягає в тому, що між функцією $f(t)$ дійсної змінної t (функцією – оригіналом) і функцією $F(p)$ комплексної змінної $p = s + i\sigma$ функцією - зображенням) встановлюється відповідність, яка дозволяє операції диференціювання та інтегрування над оригіналом $f(t)$ замінити алгебраїчними операціями над зображенням $F(p)$.

В нашому випадку оригіналом буде функція $\vartheta(r, \tau)$, яка характеризує розподіл температури в ядрі горіха за місцем і часом, а функцію - зображення позначимо $\theta(r, S)$. Між функцією оригіналу і зображенням буде існувати залежність:

$$\theta(r, s) = \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \vartheta(r, \tau) d\tau \quad (2.37)$$

Після перетворення Лапласа $\theta(r, S)$ рівняння (2.33) буде мати вигляд:

$$s\theta(r, s) - \vartheta_0 = a \left[\frac{d^2\theta(r, s)}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{d\theta(r, s)}{dr} \right] - \frac{q_0}{c\rho} \cdot \frac{1}{s + k_1} \quad (2.38)$$

Після деяких перетворень рівняння (2.38) отримуємо:

$$\frac{d^2\theta(r, s)}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{d\theta(r, s)}{dr} - \frac{q_0}{ac\rho} \cdot \frac{1}{s + k_1} - \frac{s}{a} \theta(r, s) + \frac{\vartheta_0}{a} = 0 \quad (2.39)$$

Початкові, граничні та умови симетрії після перетворення Лапласа набудуть вигляд:

$$\begin{aligned} \vartheta(r, 0) &= \vartheta_0; \\ \frac{d\theta(0, s)}{dr} &= 0; \\ \frac{d\theta(r, s)}{dr} &= H \left(\frac{t_0 - \vartheta_0}{k_2 + s} \right); \end{aligned} \quad (2.40-2.42)$$

Рівняння (2.39) після перетворення Лапласа має вигляд:

$$\frac{d^2\theta(r, s)}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{d\theta(r, s)}{dr} - \frac{s}{a} \theta(r, s) = 0 \quad (2.43)$$

Розв'язок однорідного рівняння (2.43) є частинним випадком рівняння Бесселя [16]:

$$\theta(r, s) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[c_1 ch \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) + c_2 ish \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) \right] \quad (2.44)$$

Тоді, розв'язок неоднорідного рівняння (2.39) визначається виразом:

$$\theta(r,s) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[c_1 \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) + c_2 \operatorname{ish} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right) \right] + \frac{1}{s} \left(-\frac{q_0}{c\rho} \cdot \frac{1}{k_1 + s} + \mathcal{G}_0 \right) \quad (2.45)$$

Константи c_1 і c_2 визначимо з граничних умов для зображення (2.40 – 2.42). Розв’язок рівняння (2.39) для зображення $\theta(\tau, s)$ після перетворень набуває вигляду:

$$\theta(r,s) = \frac{HR^2(t_0 - \mathcal{G}_0) \cdot \frac{1}{r} \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot r \right)}{\left[\sqrt{\frac{s}{a}} R \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) - \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \right] (k_2 + s)} + \frac{1}{s} \left(-\frac{q_0}{c\rho} \cdot \frac{1}{k_1 + s} + \mathcal{G}_0 \right) \quad (2.46)$$

Отримане рівняння (2.46) можна подати у наступному вигляді:

$$\theta(r,s) - \frac{\mathcal{G}_0}{s} = \frac{\varphi_1}{\psi_1} - \frac{\varphi_2}{\psi_2} \quad (2.47)$$

$$\text{де } \varphi_1 = HR^2(t_0 - \mathcal{G}_0) \cdot \frac{1}{r} \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} r \right);$$

$$\varphi_1 = \left[\sqrt{\frac{s}{a}} R \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) - \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \right] (k_2 + s); \quad (2.48)$$

$$\psi_2 = q_0 / c\rho; \quad \psi_2 = s(s + k_1).$$

Згідно другої теореми розкладання оригінал функції знаходиться за допомогою коренів знаменника рішення (2.47).

Поліном ψ_1 має корені $s_1 = -k_2$ та безліч коренів рівняння

$$\sqrt{\frac{s}{a}} R \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) - \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) = 0 \quad (2.49)$$

Це рівняння (2.49) має безліч коренів

$$s_n = -\frac{a}{R^2} \mu_n^2 \quad (2.50)$$

де μ_n – корені характеристичного рівняння

$$\operatorname{tg} \mu_n = -\mu_n \quad (2.51)$$

Оригінал функції φ_1 / ψ_1 знаходиться за формулою:

$$L^{-1}\left[\frac{\varphi_1}{\psi_1}\right] = \lim_{s \rightarrow k_2} \frac{\varphi_1(s)}{\psi_1(s)} e^{s\tau} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_1(s_n)}{\psi_1(s_n)} e^{s_n\tau} \quad (2.52)$$

Після підстановки і перетворення отриманого виразу знайдемо оригінал функції φ_1/ψ_1 .

$$L^{-1}\left[\frac{\varphi_1}{\psi_1}\right] = \frac{HR^2(t_0 - \mathcal{G}_0) \sin\left(\sqrt{\frac{k_2}{a}}r\right)}{r \left[\sqrt{\frac{k_2}{a}}R \cos\left(\sqrt{\frac{k_2}{a}}R\right) - \sin\left(\sqrt{\frac{k_2}{a}}R\right) \right]} e^{-k_2\tau} \quad (2.53)$$

$$+ 2\frac{aH}{r}(t_0 - \mathcal{G}_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{\mu_n}{R}r\right)}{\left(k_2 - \frac{a}{R^2}\mu_n^2\right) \sin\mu_n} e^{-\frac{a}{R^2}\mu_n^2\tau}$$

Аналогічно знайдемо оригінал функції φ_2/ψ_2 . Для цього випадку корені поліному ψ_2 мають наступні значення:

$$s = 0; \quad s_2 = -k_1$$

Тоді, оригінал φ_2/ψ_2 визначається наступним виразом:

$$L^{-1}\left[\frac{\varphi_2}{\psi_2}\right] = \frac{q_0}{k_1 c \rho} - \frac{q_0}{k_1 c \rho} e^{-k_1\tau} = \frac{q_0}{k_1 c \rho} (1 - e^{-k_1\tau}) \quad (2.54)$$

З урахуванням наведених часткових рішень та математичних перетворень розв'язок рівняння (2.33) в безрозмірному вигляді може бути представлений наступним чином:

$$\frac{\vartheta(r, \tau) - \mathcal{G}_0}{t_0 - \mathcal{G}_0} = \frac{HR^2 \sin\left(\sqrt{\frac{k_2}{a}}r\right)}{r \left[\sqrt{\frac{k_2}{a}}R \cos\left(\sqrt{\frac{k_2}{a}}R\right) - \sin\left(\sqrt{\frac{k_2}{a}}R\right) \right]} \cdot e^{-k_2\tau} \quad (2.55)$$

$$+ 2\frac{aH}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin\left(\frac{\mu_n}{R}r\right)}{\left(k_2 - \frac{a}{R^2}\mu_n^2\right) \sin\mu_n} e^{-\frac{a}{R^2}\mu_n^2\tau} \right] - \frac{q_0}{k_1 c \gamma (t_0 - \mathcal{G}_0)} (1 - e^{-k_1\tau})$$

Для спрощення сприйняття даного рівняння доцільно представити його в критеріальній формі, що є звичайним методом в теорії теплообміну. Значення критеріїв, які застосовуються в даній математичній моделі були подані вище.

З рівняння (2.55) можна виділити ще один комплекс параметрів, який ми позначимо, як

$$S = \frac{aH}{k_2 r} \quad (2.56)$$

Комплекс S характеризує відношення швидкостей розвитку нестационарних теплових процесів в матеріалі і сушильному агенті (теплоносієві). Швидкість розвитку нестационарного теплового процесу - це здатність частинок матеріалу при нагріванні або охолодженні вирівнювати температуру в окремих його частинах і по всьому об'єму.

Окрім того, введемо наступні позначення:

$$Pd_1 = \frac{k_1 R^2}{a}; Pd_2 = \frac{k_2 R^2}{a}; Pd_2^* = \frac{k_2 r^2}{a};$$

$$\vartheta = \frac{\vartheta(r, \tau) - \vartheta_0}{t_0 - \vartheta_0}; r^* = \frac{r}{R} \quad (2.57)$$

Рівняння (2.55) з урахуванням формул (2.56) і (2.57) в критеріальній формі має вигляд:

$$\vartheta = \frac{Bi \cdot \sin \sqrt{Pd_2^*} \cdot \exp(-Pd_2 Fo)}{r^* (\sqrt{Pd_2} \cos \sqrt{Pd_2} - \sin \sqrt{Pd_2})} + 2S \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\mu_n r^*) \exp(-\mu_n^2 Fo)}{(1 - \mu_n^2 / Pd_2) \sin \mu_n} -$$

$$-\frac{Po}{Pd_1} [1 - \exp(-Pd_1 Fo)] \quad (2.58)$$

Корені характеристичного рівняння (2.51) для інженерних розрахунків можна визначити графічним способом або за допомогою комп'ютера. Зокрема, наведено значення перших п'яти ненульових коренів рівняння (2.51): $\mu_1 = 2,029$; $\mu_2 = 4,913$; $\mu_3 = 7,979$; $\mu_4 = 11,085$; $\mu_5 = 14,2075$.

В рівняння (2.58), в тому числі, входить сума від одиниці до нескінченності. Бескінечний ряд, що входить до рівняння (2.58) швидко сходиться, тому достатньо трьох перших коренів характеристичного рівняння для інженерних розрахунків.

Рівняння (2.58) дозволяє визначити температуру тіла у будь-якій точці в довільний момент експозиції сушіння τ при заданих параметрах процесу

сушіння: температурі та швидкості теплоносія, вологості і температурі матеріалу, параметрах вібраційного впливу, масі та товщині шару матеріалу в сушильній камері тощо.

Певний інтерес викликає розподіл температури всередині горіха через обмеження по зниженню вмісту олійності. При постійній подачі сушильного агенту зі сталими параметрами температура матеріалу в сушильній камері змінюється від ϑ_0 на початку процесу сушіння до свого максимального значення $\vartheta(\tau)_{max}$ в кінці процесу. Розглянемо розподіл температури усередині горіху при його сталій температурі, тобто той випадок, при якому в рівнянні (2.33) ліва частина дорівнює нулю. Ця задача зводиться до вирішення наступного рівняння:

$$\frac{\partial^2 \vartheta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} - \frac{q_0}{\lambda} e^{-k_1 \tau} = 0 \quad (2.59)$$

Початкові умови залишаються аналогічними, тобто рівняння (2.34-2.36) характеризують початкові умови і в цьому випадку.

Спочатку знайдемо розв'язок однорідного рівняння

$$\frac{\partial^2 \vartheta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} = 0 \quad (2.60)$$

Розв'язок цього рівняння:

$$\vartheta(r, \tau) = \frac{c_1}{r} + c_2 \quad (2.61)$$

де c_1 і c_2 - константи інтегрування.

Постійні інтегрування c_1 і c_2 знаходиться як корені наступної системи:

$$\begin{cases} c_1'/r + c_2' = 0 \\ -c_1'/r^2 = q_0/\lambda \cdot e^{-k_1 \tau} \end{cases} \quad (2.62)$$

де c_1' і c_2' - похідні по r відповідно від c_1 і c_2 .

В цьому випадку (2.61) є і розв'язком рівняння (2.59).

Розв'язком даної системи (2.62) є:

$$\begin{cases} c_1 = -\frac{r^3}{3} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-k_1 \tau} + A_1 \\ c_2 = \frac{r^2}{2} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-k_1 \tau} + A_2 \end{cases} \quad (2.63)$$

Значення постійних A_1 і A_2 можна знайти з початкових умов (2.34-2.36).

Загальний розв'язок рівняння (2.59) буде мати вигляд:

$$\vartheta(r, \tau) = \vartheta_0 + \left(\frac{r^2}{6} + \frac{R^3}{3r} \right) \frac{q_0}{\lambda} (e^{-k_1 \tau} - 1) + HR \frac{r}{R} (t_0 - \vartheta_0) (1 - e^{-k_2 \tau}) \quad (2.64)$$

Це ж рівняння можна записати в безрозмірному вигляді, аналогічно (2.55):

$$\vartheta = \left(\frac{r^2}{6R^2} + \frac{R}{3r} \right) Po [\exp(-Pd_1 Fo) - 1] + Bi \cdot \frac{r}{R} [1 - \exp(-Pd_2 Fo)] \quad (2.66)$$

Для практичного використання рівняння (2.37) потрібно знати залежності зміни критеріїв від температури і вологості, залежність коефіцієнтів теплообміну від технологічних параметрів процесу, значення теплофізичних характеристик матеріалу, характер зміни інтенсивності негативного внутрішнього джерела тепла.

2.4 Аналіз математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині

2.4.1 Коефіцієнт теплообміну при сушінні горіхів

Аналіз рівняння (2.25) показує, що існує два основних шляхи інтенсифікації процесу сушіння - збільшення коефіцієнту теплообміну і збільшення різниці температур між теплоносієм та матеріалом. Коефіцієнт теплообміну між сушильним агентом та матеріалом залежить від цілого ряду факторів: виду матеріалу, конструктивних особливостей сушильного обладнання, аеродинаміки потоку сушильного агента, його фізичних характеристик тощо.

При цьому поняття «вид матеріалу» доволі багатогранне і, в свою чергу, включає цілий ряд факторів, таких як геометричні характеристики матеріалу, форму зв'язку вологи з сухою основою матеріалу, його фізико-механічні і теплофізичні характеристики тощо. Дієвим способом підвищення коефіцієнта теплообміну є вібраційний вплив з метою зміни реологічних властивостей

матеріалу, в нашому випадку – волоських горіхів. Без конкретного заглиблення в теорію вібраційних переміщень можна сказати, що в цьому випадку сухе тертя між частинками трансформується у в'язке тертя.

При цьому маса сипкого матеріалу (в тому числі і волоських горіхів) набуває властивостей квазірідини, що значно покращує умови вертикального і горизонтального переміщення частинок. Одним з параметрів, що характеризує інтенсивність вібраційного впливу на матеріал, є відношення вібраційного прискорення до прискорення вільного падіння – коефіцієнт $\lambda\omega = A \frac{\omega^2}{g}$. При $\lambda\omega = 0,8 \dots 0,99$ можна говорити про віброзрідження, при $\lambda\omega > 1,0$ – про віброкипіння.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування вібраційного впливу є досить перспективним напрямком інтенсифікації процесу сушіння. Потрібно зауважити, що явище вібрації є досить складним для розуміння, опису та управління фізико-механічним процесом.

Досвід вивчення закономірностей теплообміну показує, що процес обтікання теплоносієм матеріалів сферичної форми є найбільш складним для вивчення і практичної реалізації.

Сфера являє собою тіло, що погано обтікається і не має переважного напрямлення руху теплоносія.

Дослідні дані по вивченню закономірностей процесу теплообміну [108, 109] тіл різної форми, в тому числі і сферичної, дозволяють стверджувати, що при невеликих числах Re (слабкий ламінарний рух теплоносія) вплив температурного фактору досить значний і протилежне тому, що має місце при безвідривному обтіканні тіл сферичної форми. Цей вплив суттєво знижується по мірі зростання числа Re (тобто збільшення швидкості сушильного агенту) і, особливо, зі зменшенням відносного діаметра струменя теплоносія. Такі дані експериментів дозволяють зробити попередній висновок про те, що в нашому випадку реалізації процесу сушіння, коли температура сушильного агенту обмежена через ймовірність перегріву ядра горіха, реальним фактором

збільшення інтенсивності процесу сушіння стає швидкість теплоносія в шарі горіхів. Це підтверджує і ряд експериментальних досліджень проведених вказаними та іншими авторами про більший вплив швидкості сушильного агенту над його температурою.

Так, більшість авторів, для випадку ламінарного процесу течії сушильного агенту, наводять наступну формулу залежності критерія Nu (тобто коефіцієнта теплообміну) від критеріїв Re і Pr :

$$Nu = 2 + 0,03Pr^{0,33}Re^{0,54} + 0,35Pr^{0,36}Re^{0,58} \quad (2.67)$$

Із попередньо викладеного матеріалу про основи теорії подібності ми знаємо, що критерій Pr має деяку залежність від температури теплоносія, але значно більшу залежність має критерій Re від швидкості сушильного агенту.

2.4.2 Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів в вібраційній машині

Збільшення коефіцієнту тепловіддачі при сушінні волоських горіхів дає змогу визначити раціональний шлях підвищення інтенсифікації процесу сушіння волоських горіхів [35].

Розглянемо ще раз рівняння (2.25). Його права частина, яка визначає ефективність роботи системи по видаленню вологи з матеріалу (тобто процесу сушіння), показує, що є два основні шляхи інтенсифікації процесу сушіння. Найбільш простий шлях - це збільшення температури сушильного агенту. Для цього потрібно лише збільшити потужність блоку ТЕН. Але цьому простому шляху перешкоджають два суттєві фактори. По-перше, як ми пересвідчилися з попереднього підрозділу, збільшення швидкості сушильного агенту дає значно більший ефект ніж збільшення температури сушильного агенту. По-друге, в силу того, що наш матеріал є термолабільним, ми не можемо підвищувати температуру горіхів більше 36°C.

Звичайно, багато авторів пропонують відповідні заходи і засоби для підвищення енергоефективності процесу сушіння. На жаль, більшість з них носить декларативний характер, і для їх практичного застосування потрібно

вирішити немало теоретичних і практичних задач. Наприклад, в [111; 112] автори пропонують цілий ряд заходів і засобів для інтенсифікації процесу сушіння:

- застосування комбінованих методів зневоложення;
- використання систем автоматичного регулювання режимів;
- створення сушарок з активним гідродинамічним режимом;
- інтенсифікація сушіння шляхом впливу силовими полями;
- використання пристроїв для рециркуляції та підвищення потенціалу сушильного агента;
- розробка екологічно безпечних сушарок;
- розробка портативних сушарок з метою їх експлуатації в безпосередній близькості від сировинної бази.

Але ці пропозиції, знову ж таки, мають, в більшості своїй, декларативний характер і не можуть бути використані безпосередньо у виробництві.

В своїй роботі ми пропонуємо конкретний шлях збільшення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів шляхом застосування вібраційного впливу на шар горіхів у вібраційній машині. Застосування вібраційного впливу дозволить зменшити аеродинамічний опір шару матеріалу, тим самим збільшити швидкість сушильного агента, зменшити затрати на вентилювання шару горіхів. Ці заходи будуть реалізовані відповідними засобами, що дозволить значно підвищити енергоефективність всієї технології переробки волоських горіхів.

2.5 Висновки до другого розділу

1. Аналіз попередніх теоретичних та експериментальних досліджень дає змогу стверджувати, що, в загальному випадку, самим дієвим способом інтенсифікації процесу сушіння є збільшення різниці температур між сушильним агентом і матеріалом. Але для випадку сушіння волоських горіхів цю величину потрібно обмежувати, тому що неконтрольоване збільшення різниці температур може призвести до погіршення якості кінцевого продукту.

2. Для адекватного опису зміни кількості вологи в матеріалі було застосовано поняття негативних внутрішніх джерел тепла, яке еквівалентне поточній вологості матеріалу і залежить від його початкової вологості і технологічних параметрів процесу.

3. Розв'язок рівняння нестационарного процесу теплопровідності з урахуванням експоненційної зміни інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла в часі дало змогу отримати рівняння, за яким можна визначити температуру матеріалу в довільній точці об'єму в залежності від експозиції сушіння.

4. Отримане рівняння дає змогу адекватного моделювання процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині та контролювати зміну температури матеріалу для забезпечення високої якості кінцевого продукту.

5. Аналіз теоретичних даних про залежність коефіцієнта теплообміну при обтіканні сушильним агентом тіл сферичної форми дає право зробити висновок, що подальші дослідження з метою інтенсифікації процесу сушіння мають бути направлені на можливість збільшення коефіцієнта тепловіддачі, в першу чергу, шляхом збільшення швидкості сушильного агента, і можливістю турбулізації його потоку.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [55,86].

1. Цуркан О.В., Спірін А.В., Гудзенко Н.М., **Дідик А.М.** Математична модель процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-1

2. Цуркан О.В., Руткевич В.С., **Дідик А.М.** Теоретичні дослідження процесу сушіння волоських горіхів з використанням вібраційних технологій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 4. № 323. С. 337-342. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Об'єктом дослідження в даній роботі є технологічний процес сушіння волоських горіхів у вібраційній машині. При цьому елементом даної системи (технологічного процесу сушіння горіхів) є конструктивно-технологічні параметри сушарки (технологічні параметри сушарки: температура та швидкість сушильного агенту, параметри вібраційного впливу, кількісні та якісні показники продукту тощо).

В процесі виконання роботи досліджуються взаємозв'язки елементів даної системи (технологічного процесу) та їх взаємний вплив на кількісні та якісні показники процесу сушіння.

Отже, предметом досліджень є вплив конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини на техніко-економічні показники процесу сушіння при забезпеченні кондиційної якості продукції.

Згідно з метою дисертаційної роботи та поставлених завдань, а також для перевірки адекватності результатів теоретичного дослідження процесу сушіння волоських горіхів, програма проведення експериментальних досліджень включала:

- проведення досліджень по визначенню фізико-механічних та теплофізичних властивостей волоських горіхів;
- проведення досліджень по визначенню залежності коефіцієнта теплообміну від технологічних параметрів процесу;
- проведення досліджень по визначенню залежності негативних внутрішніх джерел тепла та критеріїв подібності від технологічних параметрів процесу;

- проведення досліджень по визначення раціонально-технологічних параметрів процесу сушіння та верифікації математичної моделі волоських горіхів у вібраційній машині.

Для проведення експериментальних досліджень у вібраційній машині була розроблена методика планування багатофакторного експерименту, а також методика обробки отриманих експериментальних даних.

Методика теоретичного дослідження процесу сушіння волоських горіхів в вібраційній машині базувалась на основі математичного моделювання процесу нестационарної теплопровідності в кулеподібному тілі з негативним внутрішніми джерелами тепла. Математична модель представлена у вигляді критеріального рівняння, що дає змогу визначити розподіл температури горіха в просторі і часі. Для побудови означеної моделі були використані положення нестационарної теплопровідності, теорії сушіння, математичний апарат для вирішення диференціальних рівнянь в частинних похідних за допомогою перетворення Лапласа.

При проведенні експериментальних досліджень використовували загальні та часткові положення планування, проведення, обробки та аналізу одержаних результатів реалізації багатофакторних експериментів за допомогою прикладних програм для персонального комп'ютера.

Для мінімізації затрат при проведенні експериментальних досліджень згідно принципу «Бритви Оккана» була побудована структурна модель проведення досліджень у вібраційній машині (рис. 3.1). Сушарка представлена у вигляді «чорного ящика», або багатомірної системи «вхід-вихід» [98, 113].

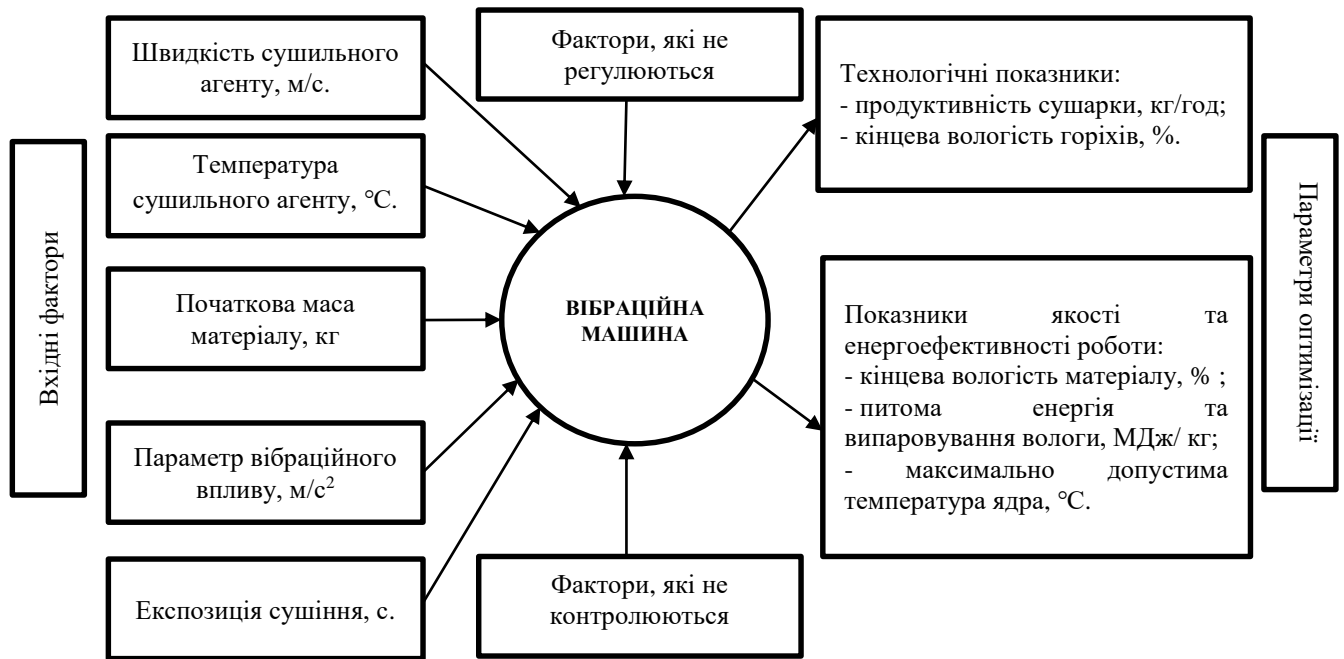


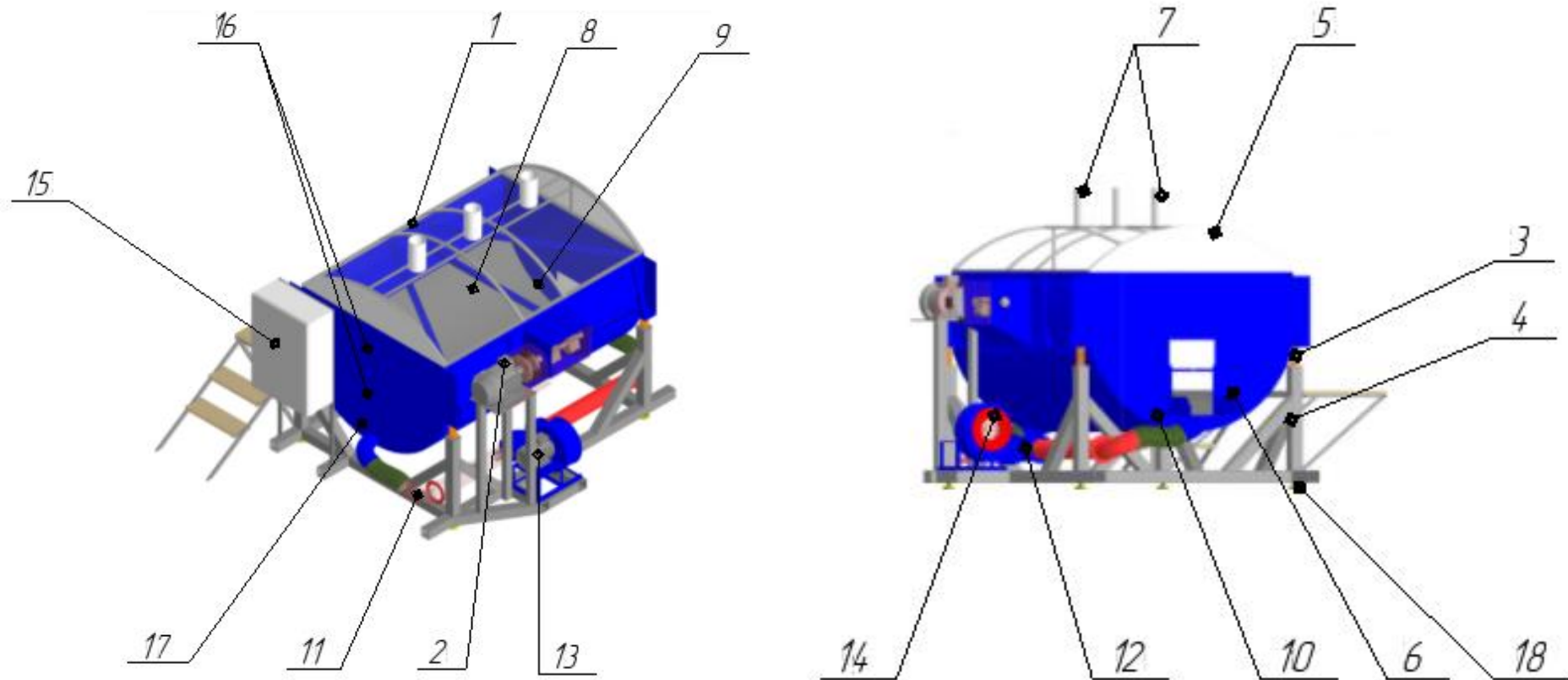
Рисунок 3.1 - Структурна модель проведення досліджень вібраційної машини (ВМ). НРФ – що не регулюються (вхідна вологість горіху); НКФ – що не контролюються (температура та відносна вологість навколишнього повітря)

Для сушіння волоських горіхів використовуємо вібраційний вплив разом із конвективним теплообміном між матеріалом і теплоносієм, в якості якого виступає підігріте повітря. Вібраційний вплив на матеріал дозволяє застосувати одночасно декілька з вищеназваних заходів. Адже при вібраційному впливі на матеріал зменшується щільність його шару, тому можна вважати, що суцільний нерухомий шар перетворюється на певну кількість шарів меншої товщини. При цьому зменшується аеродинамічний опір цих шарів, збільшується швидкість теплоносія, а отже збільшується і коефіцієнт теплообміну між матеріалом та теплоносієм. Всі ці фактори сприяють збільшенню продуктивності та енергетичної ефективності процесу сушіння.

Процес сушіння волоських горіхів є одним із важливих та енергоємних процесів переробки. Вібраційне сушіння є ефективним методом для сушіння волоських горіхів, який дозволяє зберегти якість продукту та зменшити енерговитрати. Але для досягнення найкращих результатів, необхідно дотриматись раціональних параметрів сушіння, таких як температура, відносна

вологість повітря та амплітуда коливань сушильної камери [61]. В даний час вібраційні машини та вібраційні технології широко впроваджуються і активно використовуються у всіх галузях національного господарства, таких як будівництво, транспорт, сільське господарство та медицина.

У зв'язку з вищевикладеним нами пропонується 3-D модель дослідно-промислової вібраційної машини для сушіння волоських горіхів (рис. 3.2). Теплоізольована U-подібна сушильна камера 1, що оснащена інерційним віброзбуджувачем 2, яка встановлена на пружинах елементах 3 та на рамі 4. Теплоізольована U-подібна сушильна камера 1 закрита кришкою 5, у верхній частині якої розміщені повітропроводи 7, через які здійснюється виведення відпрацьованого повітря. Нижня частина теплоізольованої U-подібної сушильної камери 1 містить перфороване днище 8 та піддон 9, що утворює робочу камеру для сушильного агента – нагрітого повітря. Для подачі теплого повітря до теплоізольованої U-подібної сушильної камери 1 використовується нагнітальний вентилятор 14, повітророзподільний пристрій 12, лінія подачі нагрітого повітря 10, у якій встановлені теплоелектронагрівачі 11. Привод нагнітального вентилятора здійснюється електродвигуном 13. На вході в теплоізольовану U-подібну сушильну камеру 1 встановлено датчик температури 17 для контролю подачі сушильного агента у робочу камеру з лінії подачі нагрітого повітря 10. В теплоізольованій U-подібній сушильній камері встановлені також трьохрівневі датчики 16 для контролю температури сушильного агента та вологості, які підключені до автоматичної системи керування 15. Для вивантаження висушеного матеріалу в нижній частині конвективно-вібраційної сушарки розміщений розвантажувальний лоток 6. Рама встановлена на віброопорах 18 [114, 115].



1 – теплоізовльована U-подібна сушильна камера; 2 – інерційний віброзбуджувач; 3 – пружини; 4 – рама;
 5 – кришка; 6 – розвантажувальний лоток; 7 – повітропроводи; 8 – перфороване днище; 9 – піддон; 10 – лінія подачі
 нагрітого повітря; 11 – теплоелектронагрівачі; 12 – повітророзподільний пристрій; 13 – електродвигун приводу
 вентилятора; 14 – нагнітальний вентилятор; 15 – автоматична система керування; 16 – трьохрівневі датчики; 17 – датчик
 температури; 18 – віброопори

Рисунок 3.2 - 3-D модель дослідно-промислової вібраційної машини для сушіння волоських горіхів

Ця конструктивна схема реалізована як дослідно-промислова модель (рис. 3.3) для сушіння волоських горіхів, її конструктивні параметри наведені в табл. 3.1.



Рисунок 3.3 – Дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри вібраційної машини

Конструктивні параметри		Одиниці вимірювання	Значення
Назва	Позначення		
Маса завантаження		кг	950
Об'єм сушильної камери	V_K	м ³	4,2
Кількість пружних елементів підвіски		шт.	4
Кількість дебалансів	n	шт.	8
Кут розвороту дебалансів	α	град.	0-180
Частота обертання електродвигуна приводу вала віброзбуджувача	$n_{\text{в}}$	хв ⁻¹	985
Частота коливань сушильної камери	f	Гц	10-24
Амплітуда коливань сушильної камери	A	мм	3-10
Ступінь завантаження сушильної камери	φ_{max}	%	75
Рівень шуму: -нормативний -дійсний		дБ	80 73
Габаритні розміри: -висота -довжина -ширина		мм	1680; 3100; 2060.

Аналіз відомих конструкцій вібраційних машин засвідчив, що раціональною формою робочої камери є U-подібна форма. Дослідження

науковців [Овчинникова П.П., Федорова О.М., Берника П.С.] доводять, що така форма робочої камери створює сприятливі умови для формування впорядкованих траєкторій переміщення часток у вібраційному полі та оновлення поверхні кожного горіха і зменшує ймовірність утворення «застійних» зон.

Вибір схеми розміщення віброзбуджувача також базується на результатах наукових робіт [Овчинникова П.П., Федорова О.М., Берника П.С., Ярошенка Л.В., Цуркана О.В.], де доведено, що значного збільшення швидкості циркуляції матеріалу можна досягти при винесенні вібратора з робочої камери.

Тобто із збільшенням відстані між віссю вібратора та геометричним центром робочої камери швидкість циркуляції матеріалу збільшуватиметься, а раціональним значенням кута між площиною, що проходить через осі камери і віброзбуджувача та горизонтом, буде $\Theta = 45^\circ$.

Таке розміщення віброзбуджувача не тільки інтенсифікує циркуляційний рух середовища, але і збільшує зону пересипання, яка сприяє більш якісному перемішуванню компонентів суміші.

Саме така схема реалізована у запропонованій конструкції, де застосований дебалансний віброзбуджувач, що забезпечує стабільність коливань і дає змогу формувати необхідне віброприскорення при раціональних енергетичних витратах.

Геометричні параметри та об'єм робочої камери визначалися з урахуванням параметрів: еквівалентний діаметр та насипна щільність. Виходячи з маси завантаження волоських горіхів 950 кг при насипній щільності 295 кг/м^3 об'єм робочої камери вібраційної машини становить $4,2 \text{ м}^3$ враховуючи цей факт, що у вібраційній машині збільшують об'єм робочої камери на 25% від об'єму завантаження.

Схема подачі теплоносія в робочу камеру з обох боків була обґрунтована шляхом проведення власних, попередніх, експериментальних досліджень. Що дає змогу забезпечити рівномірне підведення сушильного агенту в робочу камеру та унеможлиблює потрапляння рослинних решток у нагнітаючий трубопровід та до нагрівальних елементів в поєднання з механічними

коливаннями це сприяє підвищенню коефіцієнта теплообміну, уникненню локального перегріву та забезпечує стабільність процесу сушіння.

Особливістю конструкції робочої камери є наявність перфорованого днища, яке розміщене над лініями подачі сушильного агенту. В даній вібраційній машині використана металева сітка з розмірами комірок 5x5 мм та діаметром проволочи 1,5 мм, яку підтримують 8 металевих полос шириною 40 мм, що дає змогу забезпечити мінімальний аеродинамічний опір сушильному агенту, необхідну міцність перфорованого днища та сепарування рослинних решток, які потрапляють у робочу камеру разом з волоськими горіхами.

Максимальна вимушуюча сила дебалансів становить:

$$F = S_m \cdot \omega^2 = 8 \cdot m_g r_g \cdot \omega^2 \cdot \cos \frac{\gamma}{2},$$

де S_m - статичний момент маси дебаланса, $\text{кг} \cdot \text{м}$;

m_g - маса неврівноважених елементів або дебалансів, кг ;

ω - кутова швидкість обертання приводного вала віброзбуджувача, с^{-1} ;

r_g - відстань від центра ваги дебаланса до осі обертання, м ;

Кутову швидкість обертання приводного вала віброзбуджувача знайдемо за формулою:

$$\omega = \frac{n\pi}{30}$$

де n - частота обертання приводного вала, хв^{-1} ; приймаємо $n = 985 \text{ хв}^{-1}$.

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 985}{30} = 103,1 \text{ с}^{-1},$$

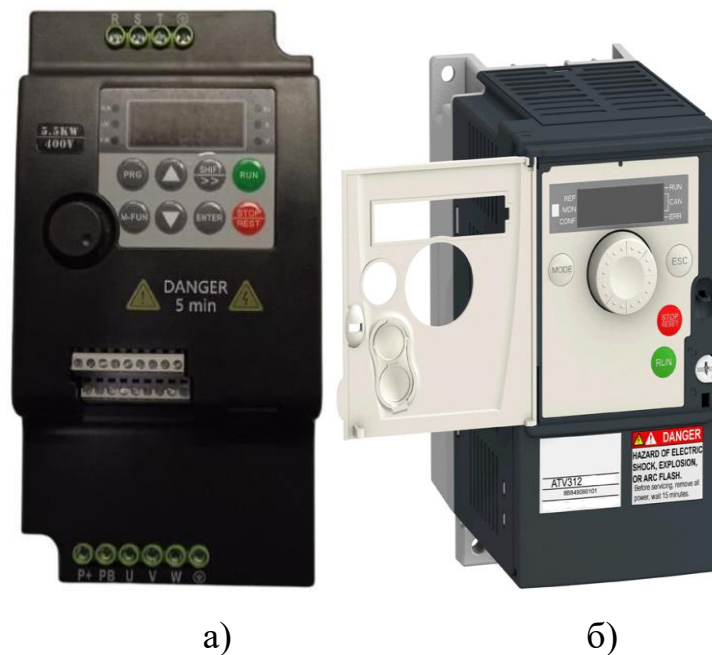
Інженерний розрахунок дебалансу та пружних елементів наведений в додатку В

3.2 Прилади для проведення експериментальних досліджень

Для визначення якісних показників процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині, для чіткого контролю та регулювання параметрів було використано ряд експериментального оснащення.

Для регулювання частоти обертання дебалансного вала, який приводився в обертовий рух за допомогою трифазного електричного двигуна AIP 80A-2, та інтенсивності коливання U-подібної камери загалом, використовувався частотний перетворювач CW 100-T5. 5GB (рис. 3.3а) виробництва Variable Frequency Inverter (VFD).

Для регулювання частоти обертання ротора вентилятора, який приводився в обертовий рух з допомогою трифазного електричного двигуна AIP112MB6, та швидкості руху підігрітого повітря взагалом, використовувався частотний перетворювач Altivar 312HU22N4 (рис. 3.3, б) виробництва Schneider Electric.



а - CW 100-T5. 5GB; б - Altivar 312HU22N4

Рисунок 3.4 - Загальний вигляд частотних перетворювачів

Для визначення швидкості руху та температури сушильного агента було використано термоанемометр АМ 831 (рис. 3.4) з виносним датчиком, що дало можливість визначати дані показники безпосередньо в повітропроводі. Основні технічні характеристики термоанемометра подано в табл. 3.2.



Рисунок 3.5 - Загальний вигляд термоанемометра АМ 831 з виносним датчиком вимірювання швидкості руху та температури повітря

Таблиця 3.2

Основні технічні характеристики термоанемометра АМ 831

Діапазон вимірювання швидкості повітря, м/с	0,4-30
Діапазон вимірювання температури повітря, °C	від -10 до +50
Інтервал вимірювань швидкості і температури повітря, м/с; °C.	0,1
Похибка вимірювання швидкості повітря, м/с	\pm (3%)
Похибка вимірювання температури повітря, °C	\pm 1,0
Швидкість вимірювання, вимірів/сек	2

Для підтримання заданої температури повітря при його нагріві електричними нагрівальними елементами (ТЕН) використовувався терморегулятор RTm 140T (рис. 3.6), який вимикав та вмикав їх живлення при досягненні максимальної та мінімальної температури відповідно. Основні технічні характеристики терморегулятора подано в табл. 3.3.



Рисунок 3.6 - Загальний вигляд терморегулятора RTm 140T

Таблиця 3.3

Основні технічні характеристики терморегулятора RTm 140T

Максимальний струм навантаження, А	63
Напруга, В	220
Робоча температура, °C	-20...+70
Ступінь захисту від проникнення, IP	20
Частота, Гц	48-52
Межі контролю температури, °C	-54...124
Максимальна потужність навантаження, кВт	8

Для визначення відносної вологості та температури нагрітого повітря в сушильній камері були встановлені трьохрівневі регулятори STC-3028 з виносними датчиками (рис. 3.7), основні технічні характеристики яких подано в табл. 3.4.



Рисунок 3.7 - Загальний вигляд регулятора температури та вологості STC-3028

Таблиця 3.4

Основні технічні характеристики термометра-вологоміра STC-3028

Принцип дії	електронний
Мінімальний діапазон вимірювань, °C	-20
Максимальний діапазон вимірювань, °C	+80
Похибка вимірювання температури, °C	± 1
Діапазон вимірювання вологи, % RH	$\pm 0,1$
Вхідна напруга, V	220
Вихідна потужність реле, A/B	10/240
Датчик	виносний (довжина кабеля 1 м)

Для визначення споживаної потужності електродвигунами приводів дебалансного валу та відцентрового вентилятора використовувався ватметр Gtpower RC (рис. 3.8), основні технічні характеристики яких подано в (табл. 3.5)



Рисунок 3.8 - Загальний вигляд ватметра Gtpower RC

Таблиця 3.5

Основні технічні характеристики ватметрів Gtpower RC

Робоча напруга, В	6,5-100
Номінальна напруга, В	80
Діапазон вимірювання:	
Потужність, кВт	0-10
Спожита енергія, кВт·год	0-9999
Струм, А	0-100
Розміри, мм	88x48

З метою визначення енерговитрат на виконання технологічного процесу сушіння волоських горіхів за допомогою дослідної вібраційної машини використовувався трьохфазний лічильник електроенергії «NIK» 2300 AP3T 5- 120A (рис. 3.9), основні технічні характеристики якого подано в табл. 3.6.



Рисунок 3.9 - Загальний вигляд трьохфазного лічильника електроенергії «NIK» 2300 AP3T 5-120A

Таблиця 3.6

Основні технічні характеристики трьохфазного лічильника електроенергії «NIK» 2300 AP3T 5-120A

Номінальна сила струму, А	5
Максимальна сила струму, А	120
Номінальна напруга, В	380
Клас точності	1
Чутливість, мА	12,5
Тип індикатора	електронний
Температура експлуатації	-40...+70
Ступінь захисту	IP54

Для визначення середньоквадратичної швидкості, амплітуди та віброприскорення було використано віброметр WT63C (рис. 3.10), основні технічні характеристики якого подано в табл. 3.7.



Рисунок 3.10 - Загальний вигляд віброметра WT63C

Таблиця 3.7

Основні технічні характеристики віброметра WT63C

Діапазон вимірювання віброприскорення, m/s^2	0,1...199,9
Діапазон вимірювання частоти, кГц	1
Частотний діапазон при вимірюванні віброшвидкості, кГц	4
Точність вимірів, %	10
Діапазон вимірювання амплітуди, мм	0,1...199,9
Діапазон вимірювання віброшвидкості, м/с	0,1...199,9

Вологість волоських горіхів під час сушіння визначалася з допомогою вологоміра ВСП-100 (Україна) (рис. 3.11), основні технічні характеристики якого подано в табл. 3.8.



Рисунок 3.11 - Загальний вигляд вологоміра ВСП-100

Таблиця 3.8

Основні технічні характеристики вологоміра ВСП-100

Метод вимірювання	кондуктометричний
Температурна компенсація	true
Крок виміру, %	0,1
Похибка, \pm	$\pm 0,1 \%$
Тип	Контактний
Мінімальний діапазон вимірювання, %	2
Максимальний діапазон вимірювання, %	98

Температура всередині волоського горіха визначалась за допомогою Voltcraft PL- 120 t1, який представлений на рис. 3.12 та інтегрального термометра типу DS18B20 рис. 3.13. Характеристики приладів подані в табл. 3.9 та табл. 3.10 відповідно.



Рисунок 3.12 - Загальний вигляд Voltcraft PL- 120 t1

Таблиця 3.9

Основні технічні характеристики Voltcraft PL- 120 t1

Діапазон вимірювання температур, °C	-210...+1100
Базова точність, %	0,3
Роздільна здатність, °C	0,1
Версія датчика	знімний
Тип датчика	K, J
Габаритні розміри, мм:	
довжина	162
висота	28
ширина	62

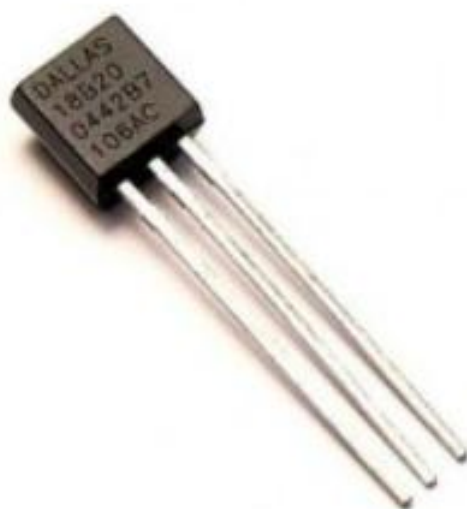


Рисунок 3.13 - Загальний інтегрального термометра типу DS18B20

Таблиця 3.10

Основні технічні характеристики датчика DS18B20

Напруга живлення, В	3,0...5,5
Діапазон температур, °C	-55...+125
Точність вимірювання температури, °C	0,5
Дискретність показань, °C	0,0625
Інтерфейс	1-Wire
Струм споживання, мА	1

3.3 Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження вібраційної машини, яка формалізована у вигляді структурної моделі (рис. 3.1), мають за мету визначення функціональних закономірностей впливу входних факторів на параметри оптимізації процесу сушіння волоських горіхів. Одним із нерегулюємих факторів даного процесу було обмеження температури ядра задля недопущення зниження вмісту олії в готовому продукті.

Створена математична модель дає змогу визначити температуру ядра горіха в просторі і часі в залежності від входних факторів та зовнішніх впливів

на процес сушіння у вигляді НРФ і НКФ. Математична модель являє собою рівняння, представлене в критеріальному вигляді. Критерії подібності, які представлені в загальному рівнянні, включають в себе всі фактори, що характеризують процес сушіння: фізико-механічні та теплофізичні властивості матеріалу, інтенсивність внутрішніх джерел тепла, коефіцієнти, що характеризують інтенсивність теплообміну між теплоносієм і матеріалом. Важливо відмітити, що в більшості випадків потрібно визначити залежність характеристик матеріалу від його вологості. Адже саме цей параметр (тобто вологість) матеріалу постійно змінюється (зменшується) і його кінцеве значення в 10% визначає закінчення процесу сушіння.

3.3.1 Методика визначення фізико-механічних властивостей волоських горіхів

В попередньому розділі при розгляді факторів, які впливають на інтенсивність процесу сушіння було відмічено, що значний вплив на перебіг цього процесу мають, в тому числі, і фізико-механічні властивості волоських горіхів. Перш за все, це стосується форми, розмірів та щільності цілого горіха та його складових.

При розгляді математичної моделі сушіння волоських горіхів було зроблено припущення, що волоських горіх – це куля в сфері. Зовнішня куля – це шкаралупа горіха і, відповідно, внутрішня – ядро горіха разом з перетинкою. Звичайно, пересічний горіх з повним припущенням можна вважати правильною кулею. Але ступінь наближення горіхів певного сорту до правильної сфери може визначатися за допомогою методики запропонованої в роботі [116].

Еквівалентний діаметр горіха визначається за формулою:

$$D_e = (L \cdot B \cdot C)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.1)$$

де L, B, C – відповідно довжина, ширина і товщина горіха, мм.

Габаритні розміри волоського горіха представлені на рис. 3.14.



Рисунок 3.14 - Габаритні розміри волоського горіха в шкаралупі

В тій же роботі [116] наведений вираз для визначення показника сферичності горіха, тобто ступінь його наближення (в %) до правильної кулі.

$$d_c = \left(\frac{D_e}{L} \right) \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

Сферичність горіха (в %) визначається як відношення еквівалентного діаметра до його найбільшого габаритного розміру.

Однією з фізико-механічних характеристик волоських горіхів є і їх щільність. Потрібно розрізняти дійсну щільність (тобто щільність одного окремо взятого горіху) і насипну щільність (тобто щільність визначеного числа горіхів, які розміщені в повному об'ємі). Щільність горіхів (дійсна) входить складовою частиною в деякі критерії подібності та теплофізичні характеристики, які були використані при створенні математичної моделі процесу сушіння.

Взагалі, щільність матеріалу (в даному випадку окремо взятого волоського горіху) – це відношення маси горіху до його об'єму. Масу горіху (середню для відібраних зразків) визначали шляхом зважування на лабораторних вагах ВЛР- 200. Об'єм горіха визначали способом знайомим людству ще з часів Архімеда – тобто витіснення рідини з мірної ємності об'ємом 0,5 л. В більшості випадків в якості рідини використовується вода, але для визначення об'єму

горіхів застосовують рідкий толуол (C_7H_8). Це зроблено тому, що толуол, на відміну від води, не поглинається шкаралупою горіху, а його поверхневий натяг менший ніж у води, і тому він заповнює неглибокі тріщини на поверхні шкаралупи.

Для визначення насипної щільності горіхів нами заповнювалась метрова ємність розміром $0,2 \times 0,2 \times 0,15$ м ($0,006$ м³), визначалась маса горіхів, а їх відношення і складало насипну щільність.

Важливою характеристикою шару волоських горіхів, який продувається потоком сушильного агенту, є пористість цього шару. Пористість шару визначається за формулою:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_n}{\rho_d} \right), \quad (3.3)$$

де ε - пористість шару горіхів, д.о.;

ρ_n – насипна щільність горіхів, кг/м³;

ρ_d – дійсна щільність горіхів, кг/м³.

Щільність дійсна і насипна залежить від вологості горіхів. Зрозуміло, що ці величини зменшуються під час процесу сушіння внаслідок зменшення маси горіха. Для розрахунків по визначенню критеріїв подібності потрібно брати середнє значення дійсної щільності. Адже при створенні математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів у конвективно-вібраційній сушарці було зроблено припущення, що фізичні властивості матеріалу (тобто горіхів) не змінюються під час процесу сушіння. Щільність горіхів (дійсна і насипна) була визначена для вологості 10, 20, 30 і 40%. Горіхи потрібної вологості відбирались з робочої камери сушарки при проведенні лабораторних експериментів. Результати досліджень наведені в четвертому розділі.

3.3.2. Методика визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів

Успішне планування та реалізація процесу сушіння волоських горіхів дуже вагомі для їх переробки та зберігання. Для проведення цього процесу з мінімальними затратами енергії та отриманням продукту визначеної якості необхідно знати залежність теплофізичних характеристик горіхів від їх вологості.

Основні теплофізичні характеристики волоських горіхів, які необхідно знати для успішної реалізації процесу сушіння – це теплоємність C [Дж/кг $^{\circ}$ С], теплопровідність λ [Вт/м $^{\circ}$ С] [75] та температуропровідність a [м 2 /с].

Ці основні теплофізичні характеристики пов'язані між собою наступною залежністю[75]:

$$C = \frac{\lambda}{\alpha \rho}, \quad (3.4)$$

де ρ – щільність матеріалу, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$.

Теплоємність матеріалу чисельно дорівнює кількості тепла, яку необхідно підвести до одиниці маси матеріалу для підвищення її температури на один градус[117].

Теплоємність рослинних матеріалів, в тому числі і волоських горіхів, завдяки їх структурі, залежить від теплоємності води і сухої речовини, тому під час процесу сушіння теплоємність зменшується. Окрім того, теплоємність залежить і від температури матеріалу, зі збільшенням температури вона зростає [75].

Коефіцієнт теплопровідності характеризує здатність матеріалу проводити тепло і чисельно дорівнює кількості тепла, яке проходить за одиницю часу через одиницю поверхні при зміні температури на один градус на одиниці довжини матеріалу. Теплопровідність матеріалу залежить від його структурної вологості (форма зв'язку води з сухою речовиною), щільності, температури. Зі

зменшенням вологості матеріалу під час процесу сушіння його теплопровідність також зменшується.

Теплопровідність шару горіхів нижча теплопровідності окремо взятого горіху через наявність повітряних проміжків між елементами шару. В зв'язку з цим теплопровідність шару горіхів залежить також від їх форми та способу укладання в шарі.

Коефіцієнт температуропровідності визначає швидкість розвитку нестационарних теплових процесів в матеріалі, тобто здатність його частинок при нагріванні або охолодженні вирівнювати температуру в окремих місцях матеріалу. Коефіцієнт температуропровідності залежить від інтенсивності переносу вологи всередині матеріалу і характеру зв'язку вологи з сухою речовиною матеріалу [75].

Теоретичне обґрунтування методу визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів, принципова схема та загальний вигляд лабораторної установки для визначення теплофізичних характеристик наведені в роботі [75].

Нагадаємо, що основою методу є використання закономірностей нестационарного нагріву двох напівобмежених стрижнів, в місці дотику яких розташовано джерело тепла постійної потужності [75].

Аналіз джерел щодо визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів та власні попередні дослідження засвідчують, що методика проведення досліджень в [75] для волоських горіхів потребує певного коригування. Розміри цілих волоських горіхів не дозволяють укласти їх в робочі контейнери (паралелепіпеди) з мінімальною порозністю. Навіть ручне ретельне укладання цілих горіхів не дозволило зменшити порозність після укладання менше 32%. Наявність в об'ємі робочих контейнерів майже третини повітря, характеристики якого значно відрізняються від аналогічних показників, як цілих горіхів, так і їх складових вносять значну похибку в результаті досліджень. В зв'язку з цим був випробуваний варіант визначення теплофізичних характеристик наважки волоських горіхів з меншою порозністю. Спосіб полягає у тому, що цілі горіхи

укладались в циліндричну ємність діаметром 150 мм і висотою 130 мм до рівня верхньої кромки шару горіхів з кінцевою поверхнею циліндричної ємності (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 - Наважка волоських горіхів в циліндричній ємності.

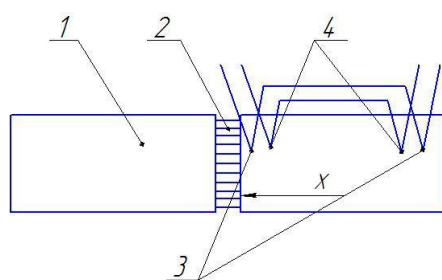
Потім визначалась величина порозності даної наважки волоських горіхів шляхом заливання рідини в циліндричну ємність. Середня порозність наважки становила приблизно 34%. Після цього наважка волоських горіхів в даній циліндричній ємності піддавалась стиску величиною $2,1 \cdot 10^5$ Па гідравлічним поршнем.

При цьому частина горіхів руйнувалась, загальний об'єм зменшувався на третину, але структура горіха залишалась практично цілою (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 - Наважка волоських горіхів після стискання.

При цьому порозність наважки волоських горіхів становила 15...17%. Таке значення порозності значно зменшує похибку у визначенні теплофізичних характеристик волоських горіхів. Надалі дослідження проводили згідно методики, яка представлена в роботі [75].



а)

б)

а – схема, б – загальний вигляд

1 - теплоізований циліндр; 2 - електричний нагрівач;

3, 4 - диференційні термометри.

Рисунок 3.17 - Лабораторна установка для визначення теплофізичних властивостей волоських горіхів

В теплоізований циліндр 1 діаметром 80мм та висотою 100 мм щільно укладали досліджувальний матеріал – волоські горіхи. Між циліндрами встановлений плоский електричний нагрівач 2. Потужність нагрівача можна регулювати в межах 50...100 Вт. Поверхні циліндрів, які дотичні до нагрівача, не теплоізовані. Температури, які необхідні для обчислення і визначення значень теплофізичних характеристик, визначались диференційними термометрами 3 і 4, холодні кінці яких розташовані на значній відстані від гарячих кінців. Таким чином досягалась постійність температури холодних кінців в процесі досліду. Відстань X між гарячими кінцями термопар варіювалась в межах 15...45 мм. Значення температури Δt_x реєстрували за допомогою терморегулятора RTm 140T [75].

Питомий тепловий потік q_0 визначали за формулою:

$$q_0 = 0,864 P/2S, \quad (3.5)$$

де p – потужність нагрівача, Вт;

S - площа нагрівача, m^2 .

Досліджуваний матеріал (волоські горіхи) поміщали в циліндри, а потім вмикався нагрівач 2. Одночасно з нагрівачем вмикали прилади RTm 140T для реєстрації температури Δt_n і Δt_x . Одночасно відбирався матеріал для визначення

його вологості. В процесі одного досліді потужність нагрівача залишалась постійною [75].

Для матеріалу однієї вологості дослідження проводили при значеннях $X = 15$ мм, 30 мм, 45 мм і потужності нагрівача $P = 50$ Вт, 75 Вт і 100 Вт. Час одного досліді становив 12 хв. [75].

Після закінчення досліді визначали значення Δt_n і Δt_x у відповідні моменти часу, визначали значення виразу $A = \operatorname{ierfc} \left(0,5642 \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n} \right)$ для моментів часу і визначалась графічна залежність комплексу A від часу в ступені $-0,5$ ($\tau^{-0,5}$) для різних значень X . Подальшими операціями, які описані в другому розділі, визначали значення всіх трьох теплофізичних характеристик волоських горіхів для даної вологості. Детальні результати проведених дослідів представлені в розділі 4.

3.4 Методика визначення залежності коефіцієнта теплообміну від технологічних параметрів процесу

При практичній реалізації процесу сушіння рослинних матеріалів, в тому числі і волоських горіхів, велике значення має можливість його інтенсифікації. В другому розділі ми розглядали різні можливості інтенсифікації процесу сушіння. Найбільш дієвими є два способи - збільшення різниці температур між теплоносієм і матеріалом, а також збільшення коефіцієнта теплообміну, що може досягатись декількома методами. На нашу думку, для такого матеріалу як волоські горіхи, цього можна досягти застосовуючи вібраційний вплив на шар матеріалу. Перший же шлях, тобто підвищення температури теплоносія і матеріалу більше певної межі призводить до зниження якості готового продукту. В другому розділі було вказано що довготривале збільшення температури ядра горіху понад 36°C призводить до денатурації олії і значного погіршення якості горіхів.

Коефіцієнт теплообміну залежить від фізичних властивостей матеріалу і теплоносія, аеродинаміки потоку сушильного агенту, характеру взаємодії

матеріалу і теплоносія тощо. На характер взаємодії, в тому числі, впливають і параметри вібраційного впливу. Нашими попередніми дослідженнями було встановлено, що коефіцієнт теплообміну збільшується з підвищенням швидкості сушильного агенту [118] та його температури. Але, як ми вже вказували, температуру можна підвищувати лише до певного рівня.

Ще одним важливим фактором, що впливає на величину коефіцієнта теплообміну, є розташування елементів в шарі матеріалу. Волоські горіхи мають специфічну форму, яка впливає на їх взаємне положення в шарі. На їх взаємне розташування впливають також параметри вібраційного впливу. Адже від цих параметрів залежить розташування горіхів, що в свою чергу впливає на аеродинамічний опір шару матеріалу.

В роботах [112, 118] розглядались теоретичні питання теплообміну при сушінні горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. Була запропонована формула для визначення питомого потоку теплоти на одиницю поверхні матеріалу в процесі сушіння:

$$q = \frac{r}{100} \rho_0 R_m \frac{dW}{d\tau}, \quad (3.7)$$

де r – теплота випаровування, Дж/кг;

ρ_0 – щільність абсолютно сухого матеріалу, кг/м³;

R_m – відношення об'єму матеріалу до його поверхні м³/м²;

$\frac{dW}{d\tau}$ – швидкість сушіння, %/с.

Формула закону Ньютона для сушіння, в нашому випадку, буде виглядати наступним чином:

$$q = \alpha(t - t_m), \quad (3.8)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/м²·°С;

t – температура сушильного агенту, °С;

t_m – температура матеріалу, °С.

Після підстановки формули (3.8) в формулу (3.7) та деяких математичних перетворень отримаємо вираз для масового коефіцієнта теплообміну:

$$\alpha_m = \frac{r(W_1 - W_2)}{100\tau \cdot \Delta t}, \quad (3.9)$$

де α_m – коефіцієнт теплообміну на 1 кг матеріалу, Вт/кг °С;

W_1 та W_2 – відповідно початкова та кінцева вологість матеріал, %

Δt – середня логарифмічна різниця температури сушильного агенту і матеріалу, °С;

τ – експозиція сушіння, с.

В роботі [118] дана залежність між теплотою випаровування води і температурою, при якій відбувається цей процес:

$$r = 2493 - 2,3t, \quad (3.10)$$

де t – температура при якій відбувається випаровування води, °С.

При сушінні процес випаровування води відбувається при змінній температурі, тому що температура сушильного агенту має максимальне значення на вході в сушильну камеру і знижується до мінімального значення на виході з неї. Тому в якості визначальної для формули (3.10) берем середню температуру процесу сушіння:

$$t = \frac{t_1 - t_2}{\ln(t_1/t_2)}, \quad (3.11)$$

де t_1 і t_2 – температура сушильного агенту, відповідно на вході та виході із сушильної камери, °С

Середня логарифмічна різниця температур у формулі (3.9) визначається, як:

$$\Delta t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}, \quad (3.12)$$

де Δ_1 та Δ_2 – різниця температур сушильного агенту та матеріалу, відповідно, на початку та в кінці процесу сушіння.

Ці теоретичні викладки в розділі методики проведення експериментальних досліджень наведені для обґрунтування методики визначення коефіцієнта теплообміну. Для цього потрібно знати певні параметри процесу сушіння, а саме початкову і кінцеву температуру теплоносія і матеріалу, початкову і кінцеву вологість матеріалу, експозицію процесу, параметри вібраційного впливу (частоту і амплітуду коливань сушильної камери). Для визначення ефекту від застосування вібраційного впливу потрібно провести серію дослідів з нерухомим

шаром горіхів і при застосуванні вібраційного впливу при всіх інших однакових технологічних параметрах процесу сушіння. В обох випадках кінцева вологість матеріалу (волоських горіхів) повинна становити необхідну величину, тобто 10%. Для цих різних умов проведення процесу сушіння треба зафіксувати експозицію сушіння, вона, звісно, буде меншою для випадків із застосуванням вібраційного впливу. Відповідно до різної експозиції сушіння, різними будуть і затрати енергії на реалізацію процесу сушіння. Всі ці дані потрібно зафіксувати і потім використати для розрахунків коефіцієнта теплообміну та питомих витрат енергії на одиницю продукції та одиницю випаруваної вологи.

Для дослідження процесу сушіння волоських горіхів була виготовлена лабораторна установка, схема якої представлена на рис. 3.2.

Вимірювання температури теплоносія та шару горіхів здійснювалось із застосуванням термопар типу Voltcraft PL- 120 t1 (рис. 3.11) та напівпровідникових інтегральних термометрів типу DS18B20 (рис. 3.12). Для дослідження було використано горіхи сорту «Chandler» повної стиглості. Початкові значення температури волоських горіхів (за вологості $W = 28\%$) прийняті з урахуванням результатів власних попередніх досліджень.

Вивчення процесу вібраційно-конвективного сушіння волоських горіхів проводилося при постійному коефіцієнті заповнення об'єму робочої камери ($K_3=75\%$) і таких змінних параметрах: швидкість та температура сушильного агента, амплітуда і частота вібрації робочої камери.

Для визначення коефіцієнта теплообміну визначали початкову і кінцеву вологість матеріалу [109], його температуру в різних точках сушильного тракту, температуру теплоносія на вході та виході із вібраційної машини термоанемометром AM 831.

Коефіцієнт теплообміну є одним з найважливіших факторів, який характеризує процес передачі тепла від сушильного агента до матеріалу. Чисельно він показує, скільки тепла сприймає одиниця маси матеріалу за одиницю часу при різниці температур між матеріалом і агентом сушіння в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Визначення зміни різниці температур сушильного агента і матеріалу

знаходилося згідно такої методики.

Як було відмічено раніше в другому розділі (2.31), різниця температур між сушильним агентом і матеріалом змінюється в часі наступним чином:

$$\Delta t = (t_0 - \vartheta_0) \exp(-k_2 \tau) \quad (3.13)$$

Постає завдання у визначенні числового значення коефіцієнта k_2 .

Для його знаходження була проведена серія дослідів на лабораторній вібраційній машині (рис. 3.2), яка була оснащена термодатчиками з відповідним обладнанням для фіксації температури сушильного агента всередині сушильної камери.

При сталому режимі роботи вібраційної машини температура теплоносія фіксується безперервно. Під час відбору проб матеріалу його температура вимірюється термодатчиками. Для зменшення впливу навколишнього середовища на температуру матеріалу відбір проб здійснюється за мінімально можливий час.

Для визначення температури сушильного агента по довжині робочої камери були встановлені стаціонарні термопары. Кожна з термопар вимірювала температуру сушильного агента у визначеній точці, яка відповідала фіксованому моменту часу для даного значення віброприскорення. Місця для заміру температури сушильного агента вибирались з таким розрахунком, щоб час проходження матеріалом відстані між місцями замірів був однаковим. Попередніми дослідженнями було встановлено що температура сушильного агента змінюється в часі практично за лінійним законом.

Було заплановано проведення серії експериментів для визначення значення коефіцієнту k_2 з рівняння (3.13). Змінними величинами в цій серії дослідів були параметри вібраційного впливу (амплітуда і частота коливань сушильної камери) та початкова різниця температур теплоносія і матеріалу.

У кожному досліді, тобто при постійних параметрах вібраційного впливу (амплітуді і частоті коливань сушильної камери) та початковій різниці температур сушильного агента і матеріалу, фіксувались в часі температури матеріалу і сушильного агента, а потім визначався коефіцієнт k_2 за робочою

формулою:

$$k_2 = \frac{\ln(t_0 - \vartheta_0) - \ln \Delta t}{\tau} \quad (3.14)$$

де $(t_0 - \vartheta_0)$ - різниця температур сушильного агента і матеріалу в момент часу $\tau = 0$; Δt - та ж різниця температур в момент часу $\tau > 0$; τ - час від початку досліду до моменту заміру температур.

При проведенні експериментів по визначенню параметрів інтенсивності сушіння фіксували вологість матеріалу, швидкість і температуру теплоносія. Вологість матеріалу визначали стандартним способом. Для визначення температури і швидкості повітря використовували термоанемометр АМ 831 та Voltcraft PL- 120 t1 .

Досліди проводили при початковій вологості матеріалу 28 % (вологовміст $U_n = 0,39$). Швидкість повітря на вході в сушильну камеру була 20, 23, і 26 м/с, а його температура, відповідно, 30; 35 і 40 °С. Всі досліди проводились згідно матриці планування експериментів у трикратній повторності.

Ще однією важливою характеристикою процесу сушіння є кінетика сушіння. Кінетика сушіння - це закономірність зміни вологості матеріалу в часі в залежності від властивостей матеріалу, параметрів процесу, параметрів навколишнього середовища тощо. При проведенні експериментальних досліджень по визначенню параметрів процесу були визначені також дані для побудови кривих сушіння. Результати експериментів по визначенню кінетики сушіння наведені в розділі 4.

3.5 Методика визначення інтенсивності внутрішніх негативних джерел тепла

В другому розділі було введено поняття негативних внутрішніх джерел тепла. У більшості випадків це поняття використовують при описі термохімічних процесів, які супроводжуються поглинанням або виділенням теплової енергії. В нашому випадку відсутня хімічна реакція, але в матеріалі

присутні джерела, які постійно поглинають тепло від сушильного агенту. В сталому режимі роботи вібраційної машини частина теплової енергії витрачається на нагрів її конструктивних елементів, частка виводиться із сушильної камери. Але змінюється кількість тепла, що поглинається самим матеріалом. На початку процесу сушіння тепло витрачається на нагрів сухої речовини складових елементів горіха (шкаралупи, ядра, перетинки), нагрів вологи, що знаходиться в цих елементах, на випаровування цієї вологи. З часом, по мірі підсихання матеріалу, кількість тепла, яка поглинається матеріалом, зменшується.

При створенні математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів було зроблено припущення, що теплофізичні характеристики матеріалу не залежать від температури. Таке припущення можна зробити через те, що температура матеріалу змінюється у відносно невеликому діапазоні. Тому кількість тепла, яке сприймається сухою масою матеріалу в процесі сушіння, залишається практично постійною. Змінюється кількість тепла, яке витрачається на випаровування вологи з матеріалу. Можна зробити припущення, що інтенсивність (потужність) негативних внутрішніх джерел тепла еквівалентна кількості вологи, яка знаходиться в матеріалі в даний момент часу.

Ці міркування і припущення дають змогу визначити коефіцієнт k_I , який характеризує зміну інтенсивності внутрішніх негативних джерел тепла.

В момент часу τ_1 інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла дорівнює q_{τ_1} , а в момент часу τ_2 – відповідно q_{τ_2} . Ми визначились з тим, що інтенсивність джерел тепла пропорційна вологості (або вологовмісту) горіхів. Все сказане дає змогу записати наступне співвідношення:

$$\frac{q_{\tau_1}}{q_{\tau_2}} = \frac{q_0 \exp(-k_I \tau_1)}{q_0 \exp(-k_I \tau_2)} = \frac{\exp(-k_I \tau_1)}{\exp(-k_I \tau_2)} = \frac{U_1}{U_2}, \quad (3.15)$$

З виразу (3.15) шляхом нескладних математичних дій можна отримати формулу для визначення коефіцієнту k_I :

$$k_1 = \frac{\ln \frac{U\tau_1}{U\tau_2}}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (3.16)$$

Дані, що отримані при проведенні дослідів по визначенню технологічних параметрів процесу сушіння волоських горіхів, були використані для визначення коефіцієнта k_1 . Реальні значення цього коефіцієнта та його залежність від параметрів процесу представлена в 4 розділі роботи.

3.6 Планування багатфакторного експерименту

Для визначення раціональних технологічних параметрів роботи вібраційної машини, що відповідають найменшим енергозатратам, був складений план багатфакторного експерименту і на його основі проведена серія дослідів. Досліди проводились з волоськими горіхами сорту «Chandler» початковою вологістю $W_{\text{п}}=28\%$, кінцева вологість становила $W_{\text{к}}=10\%$, що відповідає нормативним вимогам [33]. Критерієм оптимізації була вибрана величина енергії, яка витрачається на випаровування одиниці (1 кг) вологи. Вона визначається як результат ділення загальної величини енергії витраченої на процес сушіння на кількість вологи, яка була видалена з горіхів за час сушіння.

Як було зазначено в попередніх розділах даної роботи, одними з головних факторів, які впливають на енергетичну ефективність процесу сушіння є температура і швидкість сушильного агенту. Саме ці два показники були використані, в тому числі, і в нашій роботі. Температура сушильного агенту $t_{c.a}$ [$^{\circ}\text{C}$] змінювалась від 30°C до 40°C з інтервалом в 5°C . Верхній (максимальний) рівень цього фактору був обмежений вимогами по забезпеченню якості готової продукції. Нижній рівень температури сушильного агенту був обумовлений практичною доцільністю забезпечення енергоефективного процесу сушіння.

Другий фактор – швидкість сушильного агенту $v_{c.a}$ [м/с] – змінювався від 20 м/с (нижній рівень) до 26м/с (верхній рівень) з інтервалом в 3м/с. Рівні цього

фактору були вибрані з урахуванням практичної доцільності забезпечення подолання аеродинамічного опору шару горіхів і забезпечення максимальної енергоефективності процесу сушіння.

Третій фактор, що впливає на енергоефективність процесу сушіння – це параметр вібраційного впливу на шар волоських горіхів в сушильній камері. Більшість попередніх дослідників [119] використовували такий параметр як віброприскорення $A\omega^2$ [м/с²]. На нашу думку використання саме цього параметру в якості фактору, який характеризує інтенсивність вібраційного впливу на шар матеріалу в сушильній камері, є не зовсім правильним. Віброприскорення є другою похідною від амплітуди коливань по часу. Для режиму, що встановився, тобто має постійні параметри, з деяким припущенням можна вважати, що віброприскорення чисельно дорівнює добутку амплітуди коливань [м] на квадрат частоти коливань даної системи [1/с²]. З даного положення випливає, що одне й теж саме значення віброприскорення може бути отримано при різних співвідношеннях частоти і амплітуди коливань. Для різних умов сушіння (матеріал, його характеристики, джерело енергії тощо) значення цих окремих параметрів (тобто амплітуди і частоти коливань) можуть значно впливати на перебіг процесу. Вирішенням цієї проблеми є фіксування одного з факторів на раціональному параметрі і варіювання іншого фактору у визначених межах.

У більшості випадків фіксованим фактором є амплітуда коливань. Це можна пояснити декількома причинами. По-перше, через конструктивні особливості та проблеми з характеристиками міцності амплітуду коливань не можна варіювати в широкому діапазоні. Значно простіше варіювати частоту коливань в діапазоні, який практично не обмежується конструктивними та технологічними вимогами.

Дослідженнями технологічних процесів, в яких застосовували вібраційний вплив, було встановлено, що раціональне значення амплітуди коливань дорівнює характерному розміру частинки матеріалу, який знаходиться на вібруючій поверхні [73, 84]. Дане положення справедливе для матеріалів з незначним (до

10 мм) характерним розміром, наприклад для зернових матеріалів. Об'єктом наших досліджень є волоський горіх, для якого характерний розмір значно більший (еквівалентний діаметр становить 30-40 мм залежно від сорту горіхів). Практично реалізувати процес вібрації з такою амплітудою неможливо, як на нашій вібраційній машині, так і на інших машинах, які використовують вібраційний вплив для інтенсифікації технологічного процесу. Тому для матеріалу з частинками більшого розміру потрібно знаходити інший шлях для зменшення аеродинамічного опору шару матеріалу або фіксувати фактор амплітуди на рівні, який може забезпечити дана машина. В нашому випадку доцільною, з урахуванням всіх зазначених вимог, була фіксована величина амплітуди $A=6,5$ мм. Відповідно до цих же вимог величина віброприскорення $A\omega^2$ [м/с²] варіювалась від $a_\omega=25$ м/с² до $a_\omega=105$ м/с² з інтервалом варіювання 40 м/с².

Потрібно зауважити, що рівні та інтервал варіювання третього фактору – віброприскорення вибирались відповідно до конструктивних особливостей конвективно-вібраційної машини. Адже основною функцією даної машини є саме процес сушіння, а вібраційний вплив – це допоміжна функція, що служить для інтенсифікації головного процесу сушіння волоських горіхів.

Обробка експериментальних даних проводилась за допомогою програми *Mathematica 12.0*. Матриця планування експерименту мала наступний вигляд (табл. 3.11, 3.12).

Таблиця 3.11

Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Рівні варіювання	Фактори		
	Температура сушильного агенту, $t_{c.a.}, ^\circ\text{C}$	Швидкість сушильного агенту, $v_{c.a.}, \text{м/с}$	Віброприскорення, $A\omega^2, \text{м/с}^2$
Верхній рівень (+1)	40	26	105
Основний рівень (0)	35	23	65
Нижній рівень (-1)	30	20	25
Інтервал варіювання (E)	5	3	40

Для програми *Mathematica 12.0* трьохфакторна матриця планування експерименту має вигляд (табл. 3.12).

Таблиця 3.12

Трьохфакторна матриця планування експерименту

№ п/п	Фактори в безрозмірній системі координат			Фактори в натуральному масштабі			Вихідний параметр
	X_1	X_2	X_3	$X_1/T_{c.a}$	$X_2/V_{c.a.}$	$X_3/A\omega^2$	Q
1	-1	-1	1	30	20	105	y_1
2	1	-1	-1	40	20	25	y_2
3	-1	1	-1	30	26	25	y_3
4	1	1	1	40	26	105	y_4
5	-1	-1	-1	30	20	25	y_5
6	1	-1	1	40	20	105	y_6
7	-1	1	1	30	26	105	y_7
8	1	1	-1	40	26	25	y_8
9	-1,215	0	0	29	23	65	y_9
10	+1,215	0	0	41	23	65	y_{10}
11	0	-1,215	0	35	19	65	y_{11}
12	0	+1,215	0	35	21	65	y_{12}
13	0	0	-1,215	35	23	11	y_{13}
14	0	0	+1,215	35	23	114	y_{14}
15	0	0	0	35	23	65	y_{15}

3.7 Висновки до третього розділу.

1. Розроблена програма і методика експериментальних досліджень для визначення раціональних технологічних параметрів роботи конвективно-вібраційної сушарки. Для проведення досліджень спроектована і виготовлена лабораторна установка конвективно-вібраційної дії.

2. В якості основних технологічних параметрів процесу сушіння вибрані температура та швидкість теплоносія на вході в сушильну камеру, а також параметр вібраційного впливу на шар горіхів. Параметром вібраційного впливу вибрана величина віброприскорення при фіксованому значенні амплітуди коливань 6,5 мм. Обґрунтовані рівні та інтервали варіювання дослідних факторів та складена матриця проведення експериментів.

3. Розроблені методики для визначення фізико-механічних і теплофізичних характеристик матеріалу, а також коефіцієнта теплообміну з урахуванням вібраційного впливу. Ці дані, а також характер зміни інтенсивності внутрішніх джерел тепла дозволять провести верифікацію розробленої математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [114, 115, 118].

1. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., **Дідик А.М.**, Руткевич В.С. Конвективно-вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів: пат. 157612 Україна: МПК F26B 17/10 (2006.01); № u 2024 01129; заявл. 01.03.2024; опубл. 21.08.2024. Бюл. № 34. 10с.

2. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., **Дідик А.М.**, Руткевич В.С. Конвективно-вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів: пат.159033 Україна: МПК F26B 17/10 (2006.01); № u 2024 04771; заявл. 04.10.2024; опубл. 16.04.2025. Бюл. № 16. 9с.

3. Цуркан О.В., Спірін А.В., **Дідик А.М.**, Бондаренко М.П. Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 52-59. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Визначення фізико-механічних характеристик волоських горіхів

4.1.1 Визначення розмірних та вагових характеристик волоських горіхів

Фізико-механічні властивості матеріалу необхідні як для проведення теоретичних досліджень щодо переробки (в тому числі і сушіння) волоських горіхів, так і для практичної реалізації отриманих результатів.

В другому розділі даної роботи була розроблена математична модель процесу сушіння волоських горіхів у вібраційній машині, за допомогою якої можна планувати вивчення процесу сушіння. До критеріїв, що складають рівняння, входять фізико-механічні характеристики волоських горіхів. Вони потрібні для верифікації математичної моделі процесу сушіння. Окрім того, вагові та розмірні характеристики матеріалу потрібні для планування обсягів переробленого матеріалу, для розробки обладнання, наприклад бункери-накопичувачі, що складає технологічну лінію його переробки тощо.

При створенні математичної моделі процесу було зроблено припущення, що за формою і устроєм горіх являє собою складну геометричну фігуру «куля в сфері». Зовнішня сфера - то тверда оболонка горіху шкаралупа, а внутрішня куля – то власне ядро горіху з перетинкою. Методика визначення розмірних характеристик горіхів була представлена в третьому розділі. Досліди (тобто визначення розмірних характеристик) проводились на горіхах сорту «Chandler». Були зняті габаритні розміри із 30 випадково взятих горіхів, як показано на рис. 3.2. За формулою (3.1) був розрахований еквівалентний діаметр кожного горіху, а потім визначено його середнє значення. В результаті отримали середнє значення еквівалентного діаметру горіху сорту «Chandler»: $D_e=36,41$ мм. В третьому розділі була наведена формула (3.2) для визначення сферичності горіху, тобто його наближеність в % до правильної сфери. Для цієї ж вибірки

горіхів вона становила $d_c=91,08\%$. Це досить велике значення для цього показника, і можна сказати, що представлення в математичній моделі форми горіху як кулі було цілком правильним.

Ще однією вагомою характеристикою матеріалу є його щільність. Як уже відмічалось у третьому розділі, для волоських горіхів в нашому випадку існує дві щільності: дійсна (тобто щільність окремо взятого горіху) і насипна (тобто щільність визначеного числа горіхів, які знаходяться в певному об'ємі). Методика визначення насипної і дійсної щільності волоських горіхів докладно викладена в третьому розділі даної роботи. Залежність щільності (дійсної і насипної) волоських горіхів сорту «Chandler» від їх вологості представлені на рис. 4.1. та рис. 4.2

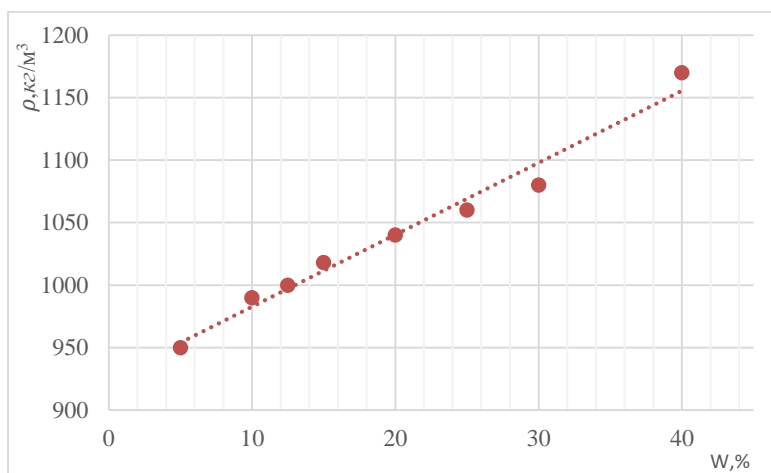


Рисунок 4.1 – Залежність дійсної щільності волоських горіхів від їх вологості

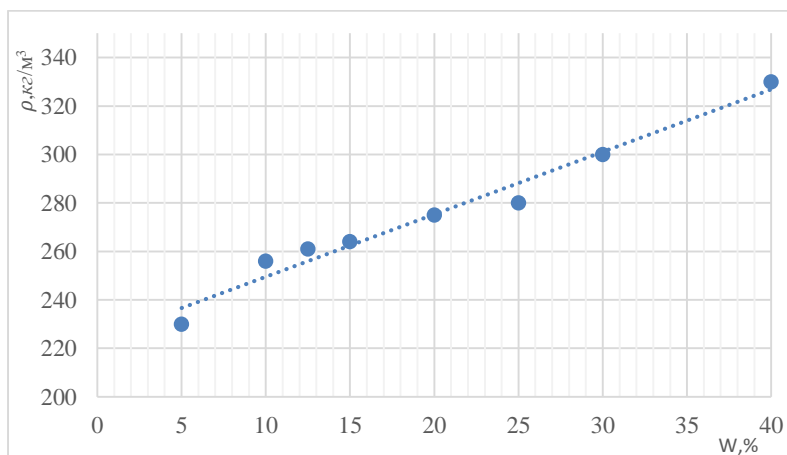


Рисунок 4.2 – Залежність насипної щільності волоських горіхів від їх вологості

Насипна і дійсна щільність волоських горіхів [кг/м³] сорту «Chandler» змінюється в залежності від їхньої вологості згідно лінійного закону. В інтервалі вологості горіхів $W=5\ldots40\%$ зміна їх щільності описується наступними рівняннями:

для дійсної щільності

$$\rho_d = 950 \exp(0.0045 \cdot W) \quad (4.1)$$

для насипної щільності:

$$\rho_n = 245 \exp(0.00537 \cdot W) \quad (4.2)$$

Насипна пористість шару волоських горіхів впливає на його аеродинамічний опір і, відповідно, на енергетичні показники процесу сушіння. В третьому розділі була представлена формула (3.3), згідно якої була вирахована пористість шару горіхів даного сорту. Для діапазону вологості вона знаходилась в межах 53,8...55,1%. Потрібно зауважити, що величина пористості шару горіхів значною мірою залежить від їх форми та способу утворення самого шару (форма ємності в якій знаходяться горіхи, висота шару, спосіб укладання горіхів тощо). Саме для того, щоб нівелювати ці фактори, і застосовують вібраційний вплив на шар горіхів. Під дією вібраційного впливу зменшується хаотичність взаємного розташування горіхів, збільшується пористість шару, що зменшує його аеродинамічний опір.

4.1.2 Визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів

В другому і третьому розділі роботи були описані, відповідно, теоретичні основи та методика проведення дослідів по визначенню теплофізичних характеристик волоських горіхів. До основних теплофізичних характеристик відносяться теплоємність C [Дж/кг⁰С], теплопровідність λ [Вт/м⁰С] та температуропровідність a [м²/с]. Були проведені дослідження по визначенню цих властивостей волоських горіхів для різної вологості матеріалу. Графічні залежності теплофізичних характеристик горіхів від їх вологості представлені на рис. 4.3 , 4.4 , 4.5.

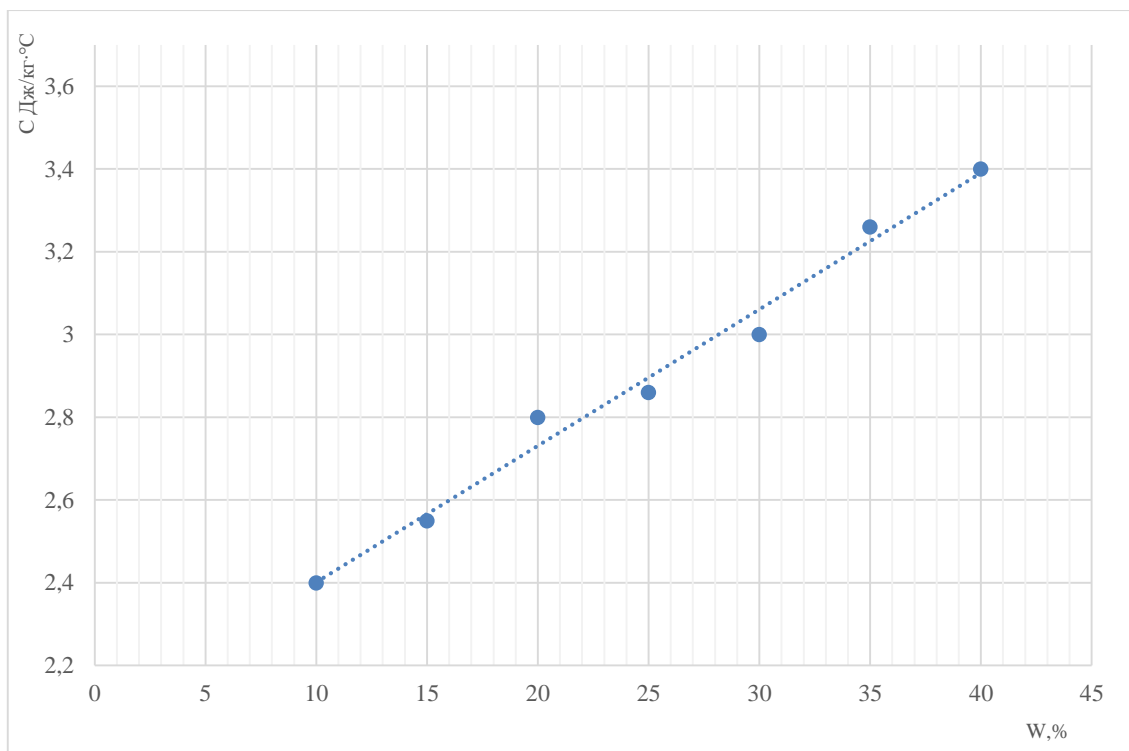


Рисунок 4.3 - Залежність теплоємності горіхів від їхньої вологості

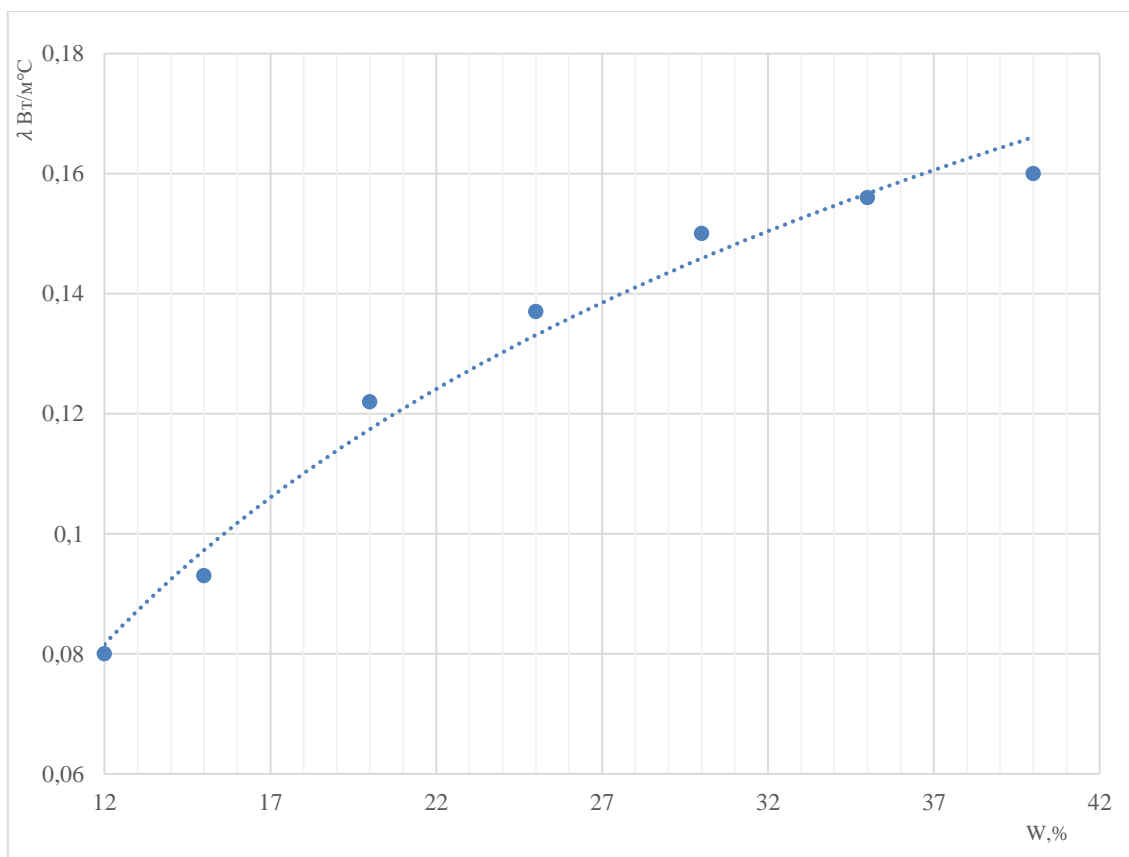


Рисунок 4.4 - Залежність теплопровідності горіхів від їхньої вологості

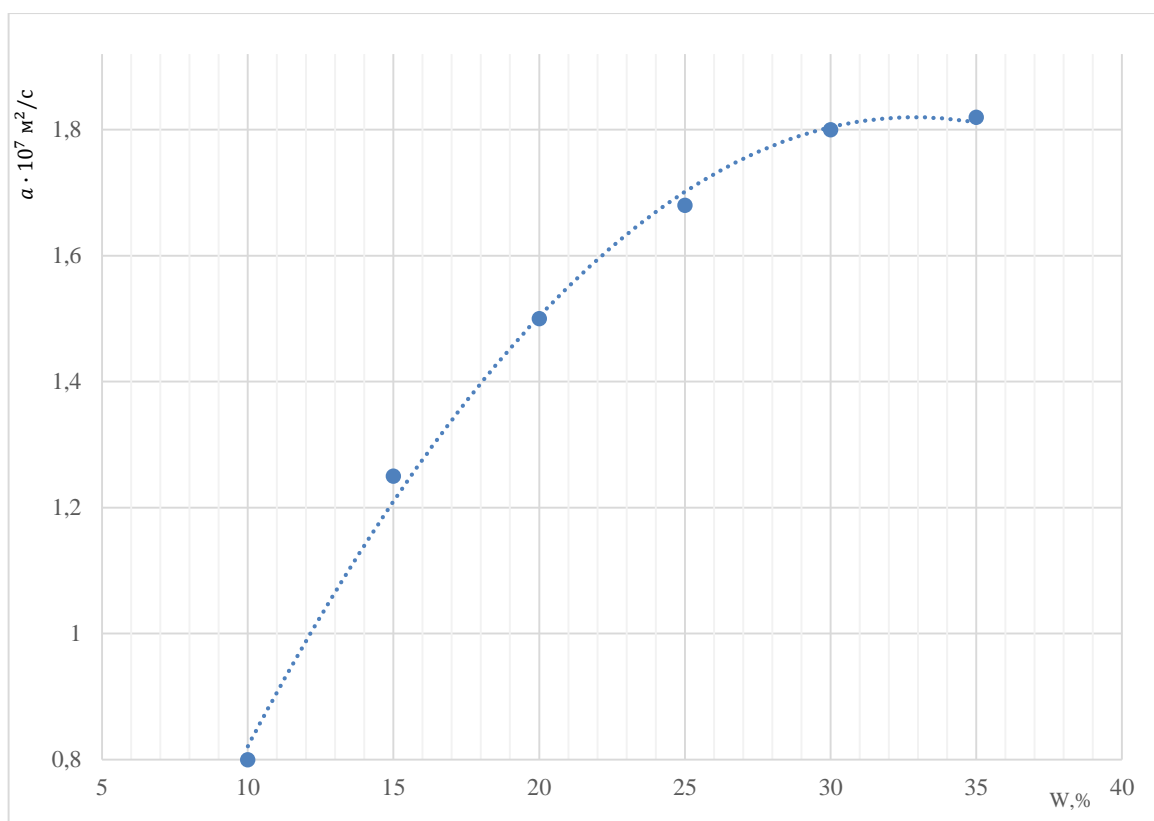


Рисунок 4.5 - Залежність температуропровідності горіхів від їхньої вологості

Графіки цих залежностей описуються наступними рівняннями:

теплоємність

$$C = 0,033 W + 2,071 \quad (4.3)$$

теплопровідність

$$\lambda = 0,015 W^{0,673} \quad (4.4)$$

температуропровідність

$$a = 0,189 W^{0,666} \quad (4.5)$$

Як видно із наведених графіків та рівнянь, що описують зміну величини теплофізичних характеристик, значення теплоємності, теплопровідності і температуропровідності зменшується зі зменшенням вологості. Тобто під час процесу сушіння їхня величина зменшується. Але в абсолютних величинах це зменшення не дуже суттєве (біля 20% в діапазоні зменшення вологості від 30% до 10%). Початкова вологість горіхів в нашому процесі сушіння становить 28%, а кінцева 10%. При створенні математичної моделі процесу сушіння (в другому розділі роботи) було зроблено припущення про постійність теплофізичних

характеристик матеріалу. Проведені дослідження по визначенню залежності теплофізичних характеристик від вологості свідчать, що дане припущення можна прийняти, бо воно не буде вносити значної похибки в результати досліджень.

З рис. 4.4 видно, що графік залежності коефіцієнта температуропровідності від вологості матеріалу має незначний перегин при $W=32...33\%$. Проведені нами попередні досліди по сушінню волоських горіхів більш високої вологості (від 40%) свідчать про наявність в цьому діапазоні вологості першої критичної точки, тобто перехід від періоду постійної швидкості сушіння до періоду падаючої швидкості сушіння. Більшість дослідників, які займалися сушінням рослинних матеріалів, наприклад [98] також отримували подібні результати і пояснювали це зміною форми зв'язку води з матеріалом. Ми також притримуємося аналогічної думки.

4.2 Визначення коефіцієнта теплообміну з урахуванням вібраційного впливу

Одним з показників ефективності процесу сушіння є коефіцієнт теплообміну між матеріалом і сушильним агентом [99]. Коефіцієнт теплообміну залежить перш за все від параметрів сушильного агента (швидкість, теплофізичні характеристики), властивостей матеріалу (вологість, теплофізичні характеристики), способу підводу теплової енергії тощо. Температура сушильного агента впливає на коефіцієнт теплообміну опосередковано, тобто вона впливає на властивості матеріалу і теплоносія, які, в свою чергу, впливають на коефіцієнт теплообміну. В нашому випадку для матеріалу постійної початкової вологості (у нас вона дорівнює 28%) коефіцієнт теплообміну буде залежати від швидкості сушильного агента та інтенсивності вібраційного впливу. З метою доказу гіпотези про доцільність застосування вібраційного впливу були проведені досліди по визначенню залежності коефіцієнту теплообміну від швидкості сушильного агента без вібраційного впливу та при

його застосуванні. Методика проведення цих досліджень представлена у третьому розділі роботи.

Перша серія дослідів була проведена з метою визначення залежності коефіцієнту теплообміну від швидкості сушильного агенту при постійній його температурі $t_{ca}=35^{\circ}\text{C}$ і початковій вологості матеріалу $W_n=28\%$ без вібраційного впливу. Графічні результати даних досліджень представлені на (рис.4.6), лінія 1.

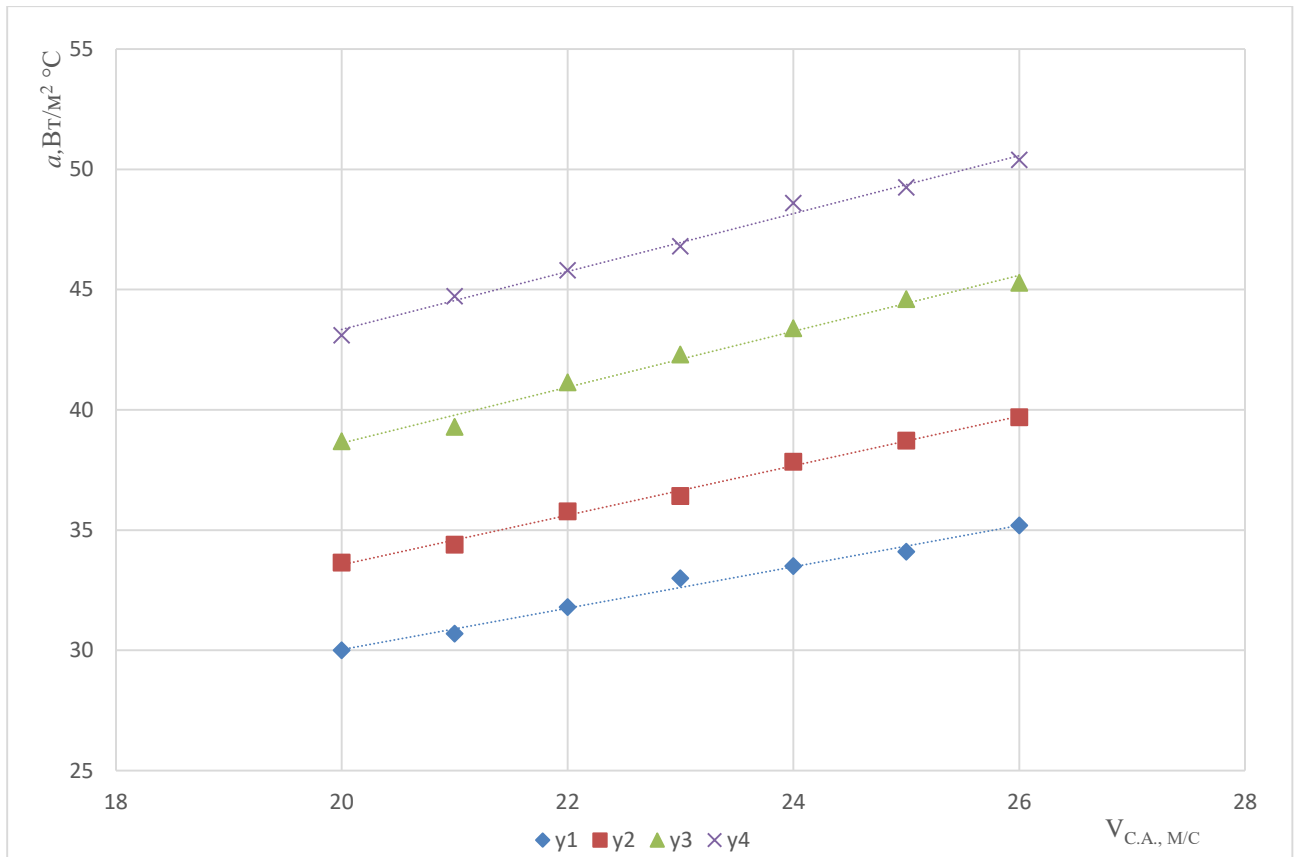


Рисунок 4.6 - Залежність коефіцієнту теплообміну від швидкості сушильного агенту при його температурі 35°C і початковій вологості матеріалу 28%: 1 - процес сушіння без вібраційного впливу ($a_{\omega}=0$); 2 – з вібрацією при віброприскоренні $a_{\omega}=25 \text{ м/с}^2$; 3 - з вібрацією при віброприскоренні $a_{\omega}=65 \text{ м/с}^2$; 4 - з вібрацією при віброприскоренні $a_{\omega}=105 \text{ м/с}^2$

Застосування вібраційного впливу для збільшення коефіцієнту теплообміну можна пояснити наступним чином. Вібраційна дія перетворює нерухомий шар волоських горіхів в квазікиплячий. Це дозволяє зменшити

аеродинамічний опір шару матеріалу та турбулізувати прикордонний шар на межі «матеріал-теплоносіє». Застосування вібраційної дії дозволяє зменшити площу так званого «дзеркального шару», відповідно збільшити площу теплообміну між матеріалом і сушильним агентом, турбулізує потік теплоносія що також сприяє інтенсифікації процесу сушіння. Зменшення аеродинамічного опору шару волоських горіхів підтверджувалось замірами швидкості сушильного агенту на вході в сушильну камеру і на виході з неї. Без вібраційного впливу швидкість на вході становила 22,5 м/с, на виході 2 м/с, а з вібраційним впливом 5 м/с.

Аналітична форма даної залежності з найменшою похибкою описується рівнянням виду $Nu=f(Re, Pr)$ для випадку обтікання теплоносієм пучка труб, які розташовані в шаховому порядку. Доречно нагадати, що це критеріальне рівняння, де Nu - критерій Нуссельта, Re - критерій Рейнольдса, Pr – критерій Прандтля. Фізичний сенс даних критеріїв наступний.

Критерій Нуссельта (Nu) характеризує співвідношення густини дійсного теплового потоку до такого, який мав би місце в умовах чистої теплопровідності через шар рідини (газу) товщиною l . Критерій Нуссельта визначається за формулою:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (4.6),$$

де α - коефіцієнт теплообміну, Вт/м²°С;

l – характерний розмір матеріалу (в нашому випадку – еквівалентний діаметр горіху), м;

λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м°С.

Залежність $Nu = f(Re, Pr)$ можна трактувати так: кількість тепла, яке переноситься (Nu) залежить від виду швидкісного поля (Re) і його зв'язком з полем температур (Pr).

Критерій Рейнольдса – показує співвідношення інерційних сил до сил в'язкості в потоці. Він визначає характер руху газу: ламінарний чи турбулентний. Критерій Рейнольдса визначається за формулою:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (4.7)$$

де v – швидкість потоку рідини (газу), м/с;

l – характерний розмір матеріалу (в нашому випадку – еквівалентний діаметр горіху), м;

ν – кінематична в'язкість рідини (газу), м²/с.

Критерій Прандтля – міра співвідношення інтенсивності перенесення імпульсу внутрішнім тертям та інтенсивності перенесення енергії теплопровідністю в потоці газу. Критерій Прандтля визначається за формулою:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (4.8)$$

де ν – кінематична в'язкість рідини (газу), м²/с;

a – коефіцієнт температуропровідності газу (коефіцієнт термічної дифузії), м²/с.

Для випадку реалізації процесу сушіння без застосування вібраційного впливу критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту теплообміну має наступний вигляд:

$$Nu = 0,074 Re^{0,6} Pr^{0,36} \quad (4.9)$$

Для випадків застосування вібраційного впливу коефіцієнт теплообміну можна розрахувати за наступною формулою:

$$\alpha_v = \alpha_{\text{бв}} (1 + 0,19 a_{\omega}^{0,87}) \quad (4.10)$$

де $\alpha_{\text{бв}}$ – значення коефіцієнту теплообміну для даних параметрів без вібраційного впливу, Вт/м²°С;

a_{ω} - параметр вібраційного впливу, в даному випадку віброприскорення сушильної камери, м/с².

Результати даних досліджень підтверджують висунуту раніше гіпотезу про те, що вібраційний вплив на оброблюване середовище за рахунок створення псевдозрідженого стану зменшує аеродинамічний опір шару волоських горіхів, що в свою чергу, збільшує коефіцієнт теплообміну та інтенсифікує процес сушіння у вібраційній машини. Дане явище можна пояснити, в тому числі, додатковою турбулізацією потоку сушильного агенту, що збільшує його число

Рейнольдса. Турбулізацію потоку теплоносія можна пояснити періодичним рухом окремих елементів шару горіхів, які здійснюють зворотно-поступальний рух в оточенні інших елементів (горіхів). Даний рух можна, з певним припущенням, представити як зворотно-поступальний рух поршня в циліндрі. На нашу думку, така модель турбулізації потоку сушильного агенту заслуговує на детальне вивчення. На жаль, обсяг і задачі даної роботи не дозволяють наразі більш детально вивчити це питання, що буде предметом наших подальших досліджень.

Результати проведення дослідів по визначенню кінетики сушіння наведені на рис 4.7. [124].

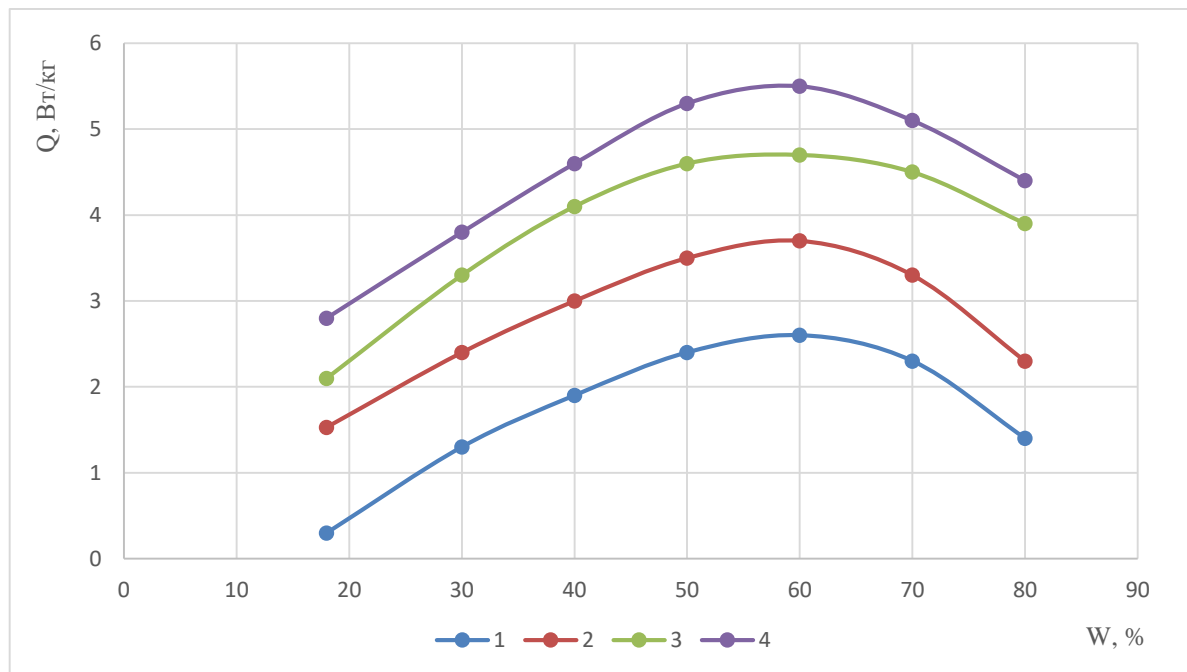


Рисунок 4.7 - Кінетика процесу сушіння волоських горіхів: 1 - $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{с.а.}} = 23\text{ м/с}$, $A\omega^2 = 0$; 2 - $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{с.а.}} = 23\text{ м/с}$; $A\omega^2 = 25\text{ м/с}^2$; 3 - $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{с.а.}} = 23\text{ м/с}$; $A\omega^2 = 65\text{ м/с}^2$; 4 - $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{с.а.}} = 23\text{ м/с}$; $A\omega^2 = 105\text{ м/с}^2$.

На графіках представлені криві сушіння для температури сушильного агенту 40°C , швидкості сушильного агенту 23 м/с , та з віброприскоренням 0 (тобто без віброприскорення); 25 ; 65 ; та 105 м/с^2 . Дані кінетики сушіння підтверджують висунуту гіпотезу про позитивну дію вібраційного впливу на енергетичні показники процесу сушіння.

Криві на рис. 4.7 описуються наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} A\omega^2 = 0 \text{ м/с}^2; & \quad y = 0,28 \cdot e^{-0.115 x} \\ A\omega^2 = 25 \text{ м/с}^2; & \quad y = 0,255 \cdot e^{-0.117 x} \\ A\omega^2 = 65 \text{ м/с}^2; & \quad y = 0,248 \cdot e^{-0.1265 x} \\ A\omega^2 = 105 \text{ м/с}^2; & \quad y = 0,253 \cdot e^{-0.1552 x} \end{aligned}$$

4.3 Визначення інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла

В другому і третьому розділах роботи були висвітлені питання теоретичного обґрунтування застосування поняття негативних внутрішніх джерел тепла та методика визначення характеристик їх функціонування. Потрібно ще раз підкреслити, що «негативні внутрішні джерела тепла», в нашому випадку це лише поняття, спосіб для визначення кількості теплової енергії, яка витрачається на процес дифузії вологи всередині матеріалу і випаровування її з його поверхні. В другому розділі, коли вводилось поняття негативних внутрішніх джерел тепла, було прийнято, що їх інтенсивність характеризується двома величинами – початковою інтенсивністю q_0 (тобто в момент часу $\tau = 0$) і коефіцієнтом k_1 . В третьому розділі була наведена методика визначення цих величин. Після обробки дослідних даних була отримана формула для визначення коефіцієнта k_1 :

$$k_1 = (0,33t^{0,38} + 0,31v^{0,66} + 1,06a^{0,74}) \cdot 10^{-5} \quad (4.11)$$

Коефіцієнт k_1 має розмірність $1/\text{с}$ і характеризує темп зменшення інтенсивності негативних джерел тепла. Інтенсивність цих джерел тепла дорівнює кількості тепла, яке витрачається на видалення вологи із горіхів віднесеної до часу за який відбулось це видалення вологи.

Залежність між сумарним і миттєвим значенням інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла має наступний вигляд:

$$q_{\Sigma} = \int_0^{\tau_K} q_0 \exp(-k_1 \tau) d\tau = \frac{q_0}{k_1} \left[1 - \exp(-k_1 \tau_f) \right] \quad (4.12)$$

де τ_f - повний час сушіння, с.

З рівняння (4.12) можна знайти q_0 :

$$q_0 = \frac{q_{\Sigma} k_1}{\left[1 - \exp(-k_1 \tau_f) \right]} \quad (4.13)$$

Величина q_0 як і k_1 залежить від ряду факторів: початкової вологості матеріалу, його теплофізичних характеристик, технологічних параметрів процесу сушіння.

Сумарна інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла залежить також від кількості води, яка випаровується з матеріалу за весь період сушіння. В даній роботі ми розглядаємо процес сушіння волоських горіхів від початкової вологості до кінцевої вологості, яка за вимогам ДСТУ [33] дорівнює 10%. Кількість води, яка випаровується з 1 кг вологого матеріалу (волоських горіхів) від початкової вологості $W_n = 28\%$ до кінцевої $W_k = 10\%$ дорівнює різниці маси води в матеріалі при відповідних вологостях і може бути визначена за формулою:

$$\Delta m = 1,11 \cdot W_n - 0,11 \quad (4.14)$$

де Δm - кількість випарованої води з 1 кг матеріалу, кг;

W_n - початкова вологість матеріалу, д.о.

Потрібно зауважити, що в рівнянні (4.12) величина q_{Σ} має розмірність [Дж], що відповідає кількості теплової енергії, яка витрачається на випаровування всієї води від W_n до $W_k = 10\%$. Досліди по сушінню горіхів, які були проведені на лабораторній конвективно-вібраційній сушарці показали, що загальні затрати енергії становлять 3,91 МДж/кг на 1 кг випарованої води. Та як було зазначено технічним директором «НІБУЛОН», що сучасні вітчизняні і закордонні конвективні сушарки витрачають на випаровування 1 кілограма води 5,35 – 5,5 МДж/кг [120].

Із них 3,3 МДж/кг витрачається саме на нагрів сухої частини матеріалу та нагрів і випаровування води, тобто це та енергія, яку ми назвали енергією

негативних внутрішніх джерел тепла. Як уже було відмічено, інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла залежить від початкової вологості. Для досліду, результат якого ми описуємо, значення q_0 розраховане за рівнянням

$$(4.13), \text{ становить } 0,045 \frac{\text{кВт}}{\text{кг}}.$$

Потрібно відмітити, що в даному випадку це кілограм матеріалу, тобто волоських горіхів початкової вологості.

Аналогічно можна знайти значення інтенсивності негативних внутрішніх джерел тепла і для інших значень початкової вологості матеріалу. За результатами дослідів також визначаються залежності всіх критеріїв, що входять в рівняння математичної моделі процесу сушіння від початкової вологості та технологічних параметрів процесу.

Характер залежності між початковою, поточною та сумарною інтенсивністю негативних внутрішніх джерел тепла показаний на рис. 4.8. Потрібно відмітити, що на даному рисунку приведена якісна залежність між цими показниками, тобто без наведення їх реальних числових значень.

Кількість тепла, яка затрачена на видалення вологи із матеріалу (тобто горіхів), можна визначити за формулою:

$$Q_{\Sigma} = \Delta M_B (C_B \Delta t_B + r) \quad (4.15)$$

Де Q_{Σ} - сумарна кількість тепла, яка витрачена на нагрів і випаровування вологи, Дж/кг;

ΔM_B - маса вологи, яка випаровувалась з 1 кг горіхів при сушінні від початкової вологості до кінцевої 10 %

C_B - питома теплоємність води, Дж/кг °С;

Δt_B - різниця початкової температури води і температури при якій відбувається випаровування, °С

r - теплота випаровування, Дж/кг.

Довідникові дані: r при температурі води 40 °С становить:

$$r = 2,41 \frac{\text{МДж}}{\text{кг в}};$$

$$C_B = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг } ^\circ\text{C}} = 0,00418 \frac{\text{МДж}}{\text{кг В}}; \quad (4.16)$$

$$\Delta M_B = 1,11 w_n - 0.11$$

ΔM – кг/кг-вологи матеріал

w_n –початкова вологість матеріалу, д.о.

Для наших дослідів $w_n = 0,28$

Кількість тепла [Мдж], затраченого на випаровування води з 1 кг горіхів початкової вологості w_k [д.о.] до кінцевої вологості $w_k = 0,1$, визначається наступною залежністю:

$$Q_\Sigma = 0,137 \cdot \exp(4.612 \cdot w_n) \quad (4.17)$$

де Q_Σ має розмірність МДж, а w_n долі одиниці.

Зокрема для початкової вологості $W_n=0,28$ при якій проводились дослід, ця величина становить 0,5 Мдж.

Відношення сумарної кількості тепла, витраченого на випаровування води до експозиції сушіння, буде сумарною (інтегральною) інтенсивністю негативних внутрішніх джерел тепла, тобто:

$$q_\Sigma = \frac{Q_\Sigma}{\tau_f} \quad (4.18)$$

де τ_f – повний час сушіння, $^\circ\text{C}$.

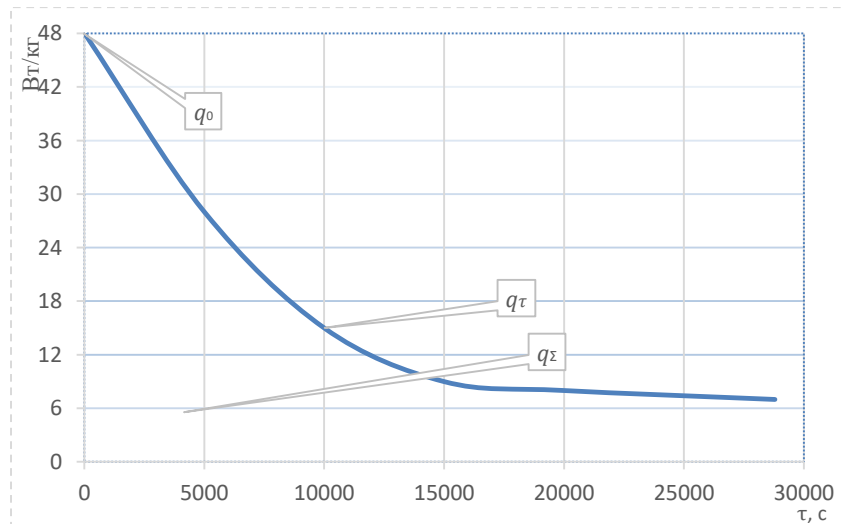


Рисунок 4.8 - Взаємозв'язок між початковою (q_0) , поточною (q_τ) та сумарною (q_Σ) інтенсивністю негативних внутрішніх джерел тепла

На нашу думку, як і багатьох дослідників [121, 122], використання поняття «негативні внутрішні джерела тепла» дає змогу значно спростити розуміння механізму дії процесу сушіння волоських горіхів, хоча і ускладнює математичне моделювання цього процесу. В більшості попередніх досліджень використовують поняття позитивних джерел тепла, особливо при дослідженні процесів, які супроводжуються фазовими переходами. Для дослідження процесів сушіння, особливо рослинних матеріалів, даний підхід застосовується значно менше. Звісно, як і кожне явище, використання поняття внутрішніх джерел тепла має свої позитивні та негативні сторони. Ми вважаємо, що в нашому випадку застосування цього наукового підходу дозволило більш повно представити математичну модель процесу сушіння волоських горіхів, визначити раціональні технологічні параметри роботи вібраційного сушильного обладнання.

4.4 Визначення раціональних технологічних параметрів роботи вібраційної машини для сушіння волоських горіхів

Для визначення раціональних технологічних параметрів процесу сушіння був спланований та проведений багатофакторний експеримент. Матриця планування експерименту та методика його проведення представлена у третьому розділі роботи. Факторами були вибрані: X_1 – температура сушильного агента t_{ca} ; X_2 – швидкість сушильного агента v_{ca} ; X_3 – віброприскорення $A\omega^2$; Y - критерій оптимізації, затрати енергії – Q .

Після обробки експериментальних даних було отримано рівняння регресії, яке приведене в натуральних величинах:

$$Q = 23,0655 - 0,345629 t + 0,00368219 t^2 - 1,0204 v + 0,00207062 t v + 0,0200836 v^2 - 0,00654576 A\omega^2 - 0,000110087 t A\omega^2 - 0,00032114 v A\omega^2 + 0,0000822649 A\omega^2 \quad (4.19)$$

Проведений аналіз рівняння регресії показав, що воно адекватне дослідним даним для 5% рівня значущості. Розрахунки адекватності рівняння регресії наведені в (додатку Е).

Поверхні відгуку при фіксованому одному з трьох факторів наведені на рисунках 4.9, 4.10, 4.11.

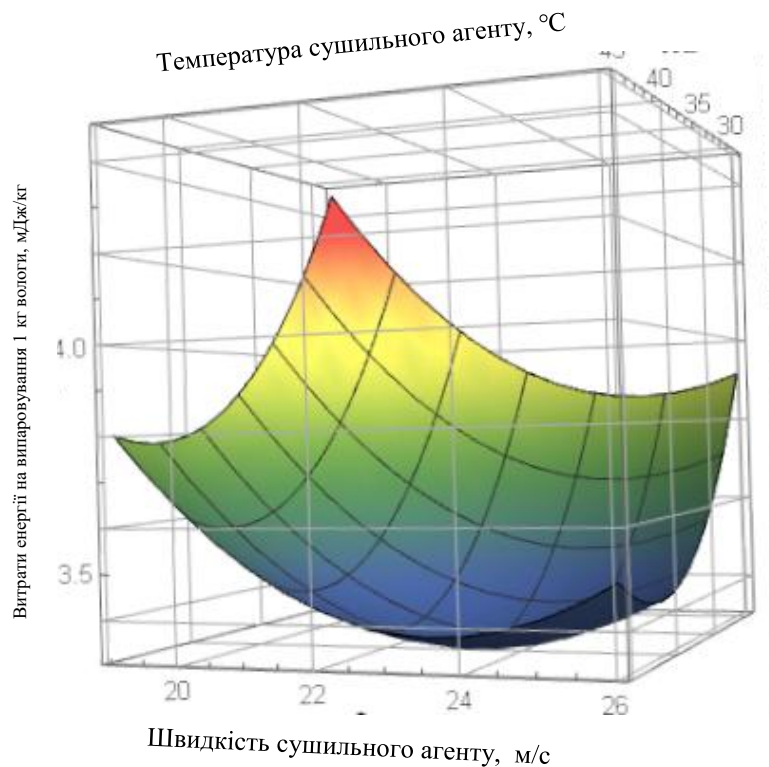


Рисунок 4.9 - Залежність питомих енерговитрат від температури та швидкості сушильного агенту

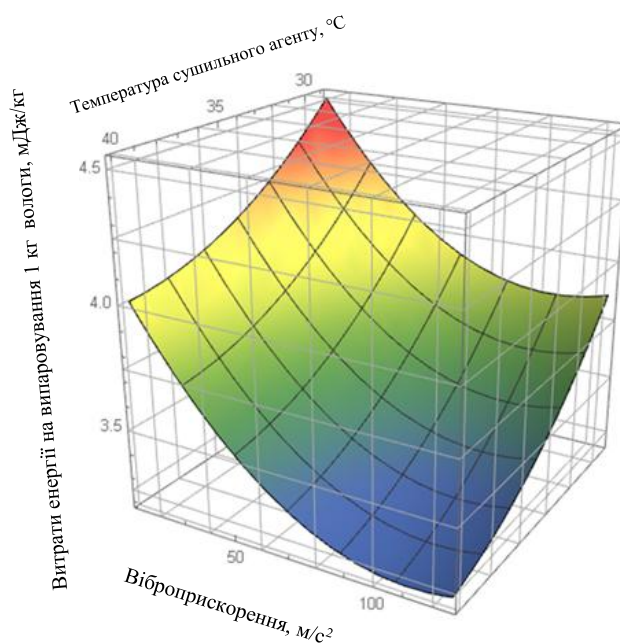


Рисунок 4.10 - Залежність питомих енерговитрат від температури сушильного агенту та віброприскорення

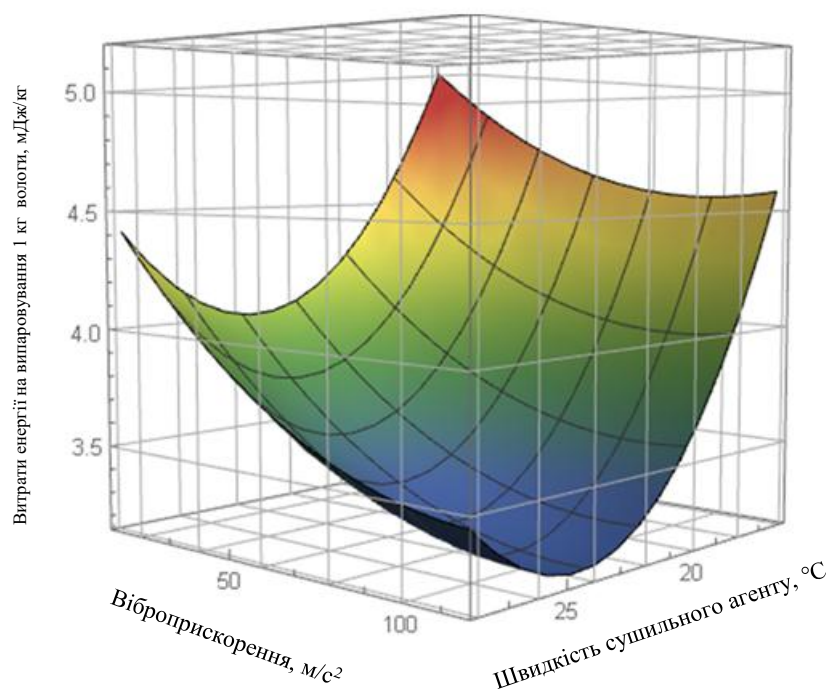


Рисунок 4.11 - Залежність питомих енерговитрат від швидкості сушильного агента та віброприскорення

Аналіз отриманого рівняння регресії з метою знаходження раціональних технологічних параметрів проводився за допомогою двовірних перетинів. Знаходження раціональних параметрів роботи дослідно-промислового зразка вібраційної машини було зроблено шляхом аналізу рівняння регресії. Аналіз рівняння регресії був проведений за допомогою програми *Mathematica 12.0*. Результати яких представлено в додатку Г, Д.

Проведений аналіз рівняння регресії дозволив визначити наступні раціональні параметри: температура сушильного агента 38°C , швидкість сушильного агента $22,5 \text{ м/с}$, віброприскорення сушильної камери $65,6 \text{ м/с}^2$ при фіксованій амплітуді її коливань $6,5 \text{ мм}$.

При проведенні досліджень для визначення раціональних технологічних параметрів була додатково проведена серія дослідів з метою верифікації математичної моделі (рівняння 2.46). Результати цих дослідів показані на рис. 4.12 [108, 127].

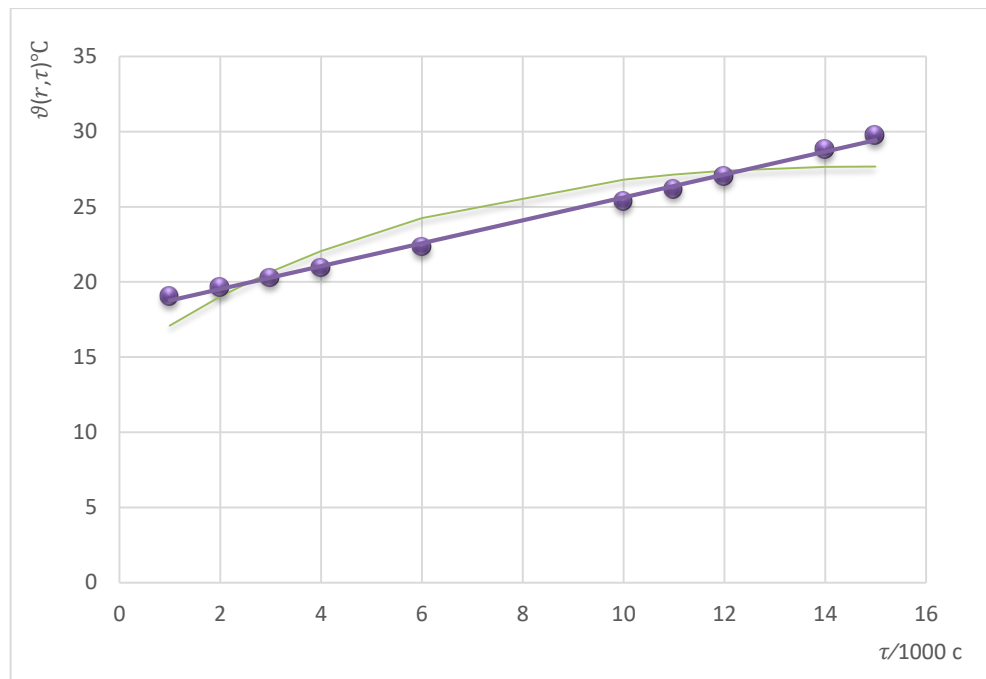


Рисунок 4.12 - Температура матеріалу в процесі сушіння при температурі теплоносія 35°C і температурі навколишнього середовища 15°C .

Теоретична крива описується рівнянням (4.16) а дані експерименту апроксимуються рівнянням (4.17):

$$v_T = 18,188 \exp(0.113 \tau) \quad (4.20)$$

$$v_{\text{екс}} = 18,33 \exp(0.11\tau) \quad (4.21)$$

Точки на графіку відповідають експериментальним даним, а лінія описується рівнянням (2.47). Різниця між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 11%, що дає підстави вважати, що математична модель адекватно описує процес сушіння волоських горіхів у розробленій і виготовленій нами вібраційній машині. А проведена статистична оцінка відповідності теоретичних та експериментальних даних показала що середнє відхилення між моделлю та експериментом становить лише 5%, що наведено в додатку Е.

4.5 Висновки до четвертого розділу

1. Дослідження розмірно-вагових характеристик волоських горіхів сорту «Chandler» свідчать, що за формою вони являють собою майже правильну сферу. Еквівалентний діаметр горіха становить 34,87 мм, а сферичність – 91,08%. Це

досить велике значення для цього показника, і можна сказати, що представлення в математичній моделі форми горіху як кулі було цілком обґрунтованими. Пористість насипного шару горіхів становила 53,8...55,1%.

2. Волоські горіхи, як і всі рослинні матеріали за формою зв'язку вологи з сухою речовиною відносяться до колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Тому характер залежності їх основних теплофізичних характеристик (теплоємності, теплопровідності, температуропровідності) від вологості в межах 10...40% схожий на ці ж характеристики для інших рослинних матеріалів. Лінійна залежність теплоємності, слабо виражена ступенева залежність у теплопровідності, невеликий перегин у температуропровідності в районі вологості 32...34% - все це характерно і для інших рослинних матеріалів.

3. В межах вологості 10...30% теплофізичні характеристики змінюються на незначну величину (біля 20%). При розробці математичної моделі процесу сушіння було зроблено припущення, що ці характеристики постійні під час всієї експозиції сушіння. Результати наших досліджень підтверджують обґрунтованість цього припущення.

4. Результати досліджень по визначенню вібраційного впливу на коефіцієнт теплообміну підтверджують висунуту гіпотезу про те, що вібрація є дієвим способом інтенсифікації процесу сушіння. Коефіцієнт теплообміну із застосуванням вібраційного впливу більший ніж без нього на 20...27%, при однакових значеннях температури і швидкості сушильного агента. Висунута гіпотеза, яка, при подальших дослідженнях, може пояснити причину виникнення цього явища.

5. В результаті експериментальних досліджень отримані формули для визначення основних показників, що характеризують інтенсивність негативних внутрішніх джерел тепла – початкової інтенсивності q_0 та коефіцієнта k_1 . Проаналізовані переваги та недоліки застосування цього поняття для опису процесу сушіння волоських горіхів. На нашу думку, переваги застосування цього методу значно переважають недоліки, які пов'язані з деяким ускладненням математичних перетворень при створенні моделі процесу сушіння.

6. В результаті проведення дослідів по визначенню раціональних технологічних параметрів процесу сушіння отримано рівняння регресії та побудовані поверхні відгуку. Аналіз рівняння регресії дозволив визначити раціональні технологічні параметри: температура сушильного агенту 38°C , його швидкість $22,5 \text{ м/с}$, віброприскорення сушильної камери $65,6 \text{ м/с}^2$ при постійній амплітуді її коливань $6,5 \text{ мм}$.

7. Верифікація математичної моделі показала розбіжність між теоретичними та експериментальними даними не більше 11% , що свідчить про адекватність розробленої математичної моделі процесу сушіння волоських горіхів. А проведена статистична оцінка відповідності теоретичних та експериментальних даних показала що середнє відхилення між моделлю та експериментом становить лише 5%

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [95, 127].

1. Kaletnik G., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prysiazniuk D. **Didyk A.** Substantiation of the operating parameters of walnut drying equipment. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11(2). P. 27–35. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).f4

2. Цуркан О.В., Спирін А.В., Руткевич В.С., **Дідик А.М.** Оцінка ефективності процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 5-12. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБЛЕНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

5.1 Економічне обґрунтування розробленої вібраційної машини

Економічна ефективність розробленої вібраційної машини для сушіння волоських горіхів визначається в процесі її роботи. Перспективність застосування запропонованої машини, на підставі теоретичних і експериментальних досліджень, може бути визначена економічною ефективністю її використання. Дана ефективність визначається шляхом співставлення витрат на виконання технологічного процесу сушіння волоських горіхів за допомогою розробленої вібраційної машини та базової машини аналогічного призначення [128, 129].

Економічна ефективність використання вібраційної машини для сушіння волоських горіхів розрахована за умови річного навантаження на одну машину. При цьому, за базу для порівняння, прийнята конвективна сушарка для волоських горіхів серійного виробництва [62].

В таблиці 5.1 наведені техніко-економічні показники вібраційної машини та базової машини аналогічного призначення.

Таблиця 5.1

Техніко-економічні показники досліджуваних машин

Показники	Машина	
	Розроблена	Базова
Об'єм робочої камери, м ³	4,2	2,5
Продуктивність машин, кг/год	125	83,33
Маса машин в зборі, кг	960	900
Відпускна ціна базової машини, грн	-	328000

Продовження таблиці 5.1

Показники	Машина	
	Розроблена	Базова
Собівартість машини	237500	-
Вартість матеріалу у собівартості машини, грн	190000	-
Загальна потужність машини кВт/год.	27,5	14
Коефіцієнт, який враховує відрахування на додаткову заробітню плату, %	-	23
Коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні потреби, %	-	22
Вартість покупних виробів, що використовуються у новій машині, грн	31000	-
Норматив витрат праці на підготовку машини до зберігання, люд.-год.	4	5
Годинна тарифна ставка слюсаря, грн/год	98	98
Норматив галузевої рентабельності, %		25
Податок на додану вартість, %		20

5.1.1 Визначення вартості розробленої машини

Вартість 1 кг чистої маси матеріалів, що йдуть на виготовлення нової машини:

$$M = \frac{C_{mn}}{\sigma_n}, \quad (5.1)$$

де C_{mn} – вартість матеріалів у собівартості нової машини, грн;

σ_n – чиста маса нової машини без покупних частин, кг.

Затрати на виготовлення нової машини без вартості матеріалів і покупних частин, що йдуть на 1 кг її чистої маси:

$$H = \frac{C_n - (C_{mn} + C_{pvn})}{\sigma_n}, \quad (5.2)$$

де C_n – собівартість нової машини, грн;

C_{pvn} – вартість покупних виробів, що використовуються у новій машині, грн;

σ_n – чиста маса нової машини без покупних частин, кг.

Галузева собівартість нової машини на стадії технічного завдання:

$$C_o = \sigma_n \cdot (\lambda \cdot H \cdot K_n + M) + C_{pvn} \cdot K_{tz}, \quad (5.3)$$

де σ_n – чиста маса нової машини без покупних частин, кг;

λ – коефіцієнт конструктивної складності нової машини в порівнянні з технологією виготовлення базової машини;

K_n – коефіцієнт зміни «Н» залежно від обсягу випуску;

K_{tz} – коефіцієнт транспортно-заготівельних робіт.

Нормативний прибуток:

$$P_n = \frac{C_o \cdot P_o}{100}, \quad (5.4)$$

де P_o – норматив галузевої рентабельності, %.

Оптова ціна нової машини з урахуванням податку на додану вартість:

$$S_o = (C_o + P_n) \cdot \left(1 + \frac{P_{dv}}{100}\right), \quad (5.5)$$

де P_{dv} – податок на додану вартість, %.

Відпускна ціна нової машини з урахуванням торгівельної націнки посередницької організації, яка здійснює продаж техніки:

$$S_n = S_o \cdot \left(1 + \frac{T_c}{100}\right), \quad (5.6)$$

де T_c – торгівельна націнка посередницької організації, %.

5.1.2 Визначення економічної ефективності розробленої машини

Річний обсяг роботи машини:

– для нової машини:

$$Q_n = W_n \cdot D_n \cdot T, \quad (5.7)$$

де D_n – тривалість роботи нової машини протягом року, днів;

– для базової машини:

$$Q_b = W_b \cdot D_b \cdot T, \quad (5.8)$$

де D_b – тривалість роботи базової машини протягом року, днів.

Збільшення річного виробітку нової машини за рахунок підвищення її продуктивності:

$$Q = Q_n - Q_b. \quad (5.9)$$

Затрати праці на сушіння волоських горіхів:

– для нової машини:

$$V_{zn} = \frac{L_n}{W_n}, \quad (5.10)$$

де L_n – чисельність обслуговуючого персоналу нової машини, люд.;

– для базової машини:

$$V_{zb} = \frac{L_b}{W_b}, \quad (5.11)$$

де L_b – чисельність обслуговуючого персоналу базової машини, люд.

Річна економія затрат праці при застосуванні нової машини:

$$V = Q \cdot (V_{zb} - V_{zn}). \quad (5.12)$$

Основна заробітна плата працівників:

– для нової машини:

$$ZP_{on} = \frac{L_n \cdot f}{W_n}, \quad (5.13)$$

де f – тарифна годинна ставка працівника, грн/год;

– для базової машини:

$$ZP_{ob} = \frac{L_b \cdot f}{W_b}. \quad (5.14)$$

Відрахування на додаткову оплату, які враховують витрати на оплату чергових і додаткових відпусток, часу для виконання державних і громадських обов'язків:

— для нової машини:

$$ZP_{dn} = ZP_{on} \cdot \frac{K_d}{100}, \quad (5.15)$$

де K_d — коефіцієнт, який враховує відрахування на додаткову заробітну плату, %.

— для базової машини:

$$ZP_{db} = ZP_{ob} \cdot \frac{K_d}{100}. \quad (5.16)$$

Відрахування на оплату праці працівників:

— для нової машини:

$$ZP_n = ZP_{on} + ZP_{dn}; \quad (5.17)$$

— для базової машини:

$$ZP_b = ZP_{ob} + ZP_{db}. \quad (5.18)$$

Відрахування на соціальні потреби:

— для нової машини:

$$CP_n = \frac{ZP_n \cdot K_s}{100}, \quad (5.19)$$

де K_s — коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні потреби, %;

— для базової машини:

$$CP_b = \frac{ZP_b \cdot K_s}{100}. \quad (5.20)$$

Амортизаційні відрахування на реновацію машини:

— для нової машини:

$$A_n = \frac{S_n \cdot a}{100 \cdot W_n \cdot T \cdot D}, \quad (5.21)$$

де a — нормативний коефіцієнт відрахувань на реновацію, %;

— для базової машини:

$$A_b = \frac{S_b \cdot a}{100 \cdot W_b \cdot T \cdot D}. \quad (5.22)$$

Відрахування на капітальний, поточний ремонт і технічне обслуговування машини:

— для нової машини:

$$R_n = \frac{S_n \cdot a}{100 \cdot W_n \cdot T \cdot D}; \quad (5.23)$$

— для базової машини:

$$R_b = \frac{S_b \cdot a}{100 \cdot W_b \cdot T \cdot D}. \quad (5.24)$$

Витрати на енергоресурси, необхідні для приводу машини:

— для нової машини:

$$P_{zn} = \frac{N_{cn} \cdot t_{vn} \cdot C_e}{W_n}, \quad (5.25)$$

де N_{cn} — загальна потужність, що необхідна для приводу нової машини, кВт;

t_{vn} — час роботи електродвигунів нової машини протягом години, год;

C_e — вартість електроенергії, грн/(кВт·год);

— для базової машини:

$$P_{zb} = \frac{N_{cb} \cdot t_{vb} \cdot C_e}{W_b}. \quad (5.26)$$

де N_{cb} — загальна потужність, що необхідна для приводу базової машини, кВт;

t_{vb} — час роботи електродвигунів базової машини протягом години, год.

Витрати на зберігання машини:

— для нової машини:

$$Z_n = \frac{T_{nn} \cdot T_{sn}}{Q_n}, \quad (5.27)$$

де T_{nn} — норматив витрат праці на підготовку нової машини до зберігання, люд.-год;

T_{sn} – годинна тарифна ставка слюсаря, який обслуговує нову машину, грн/год;

– для базової машини:

$$Z_b = \frac{T_{nb} \cdot T_{sb}}{Q_b}, \quad (5.28)$$

де T_{nb} – норматив витрат праці на підготовку базової машини до зберігання, люд.-год;

T_{sb} – годинна тарифна ставка слюсаря, який обслуговує базову машину, грн/год.

Відрахування на експлуатаційні матеріали:

– для нової машини:

$$U_{emn} = \frac{U_{mn}}{Q_n}, \quad (5.29)$$

де U_{mn} – витрата на матеріали, що використовуються при експлуатації нової машини, грн;

– для базової машини:

$$U_{emb} = \frac{U_{mb}}{Q_n}, \quad (5.30)$$

де U_{mb} – витрата на матеріали, що використовуються при експлуатації базової машини, грн.

Повна собівартість робіт:

– для нової машини:

$$C_{sn} = ZP_n + CP_n + A_n + R_n + P_{zn} + Z_n + U_{emn}; \quad (5.31)$$

– для базової машини:

$$C_{sb} = ZP_b + CP_b + A_b + R_b + P_{zb} + Z_b + U_{emb}. \quad (5.32)$$

Експлуатаційні витрати на машину:

– для нової машини:

$$U_n = ZP_n + CP_n + R_n + P_{zn} + U_{emn}; \quad (5.33)$$

– для базової машини:

$$U_b = ZP_b + CP_b + R_b + P_{zb} + U_{emb}. \quad (5.34)$$

Питомі капіталовкладення в сфері експлуатації машини:

– для нової машини:

$$K_{pn} = \frac{S_n}{W_n \cdot D \cdot T}; \quad (5.35)$$

– для базової машини:

$$K_{pb} = \frac{S_b}{W_b \cdot D \cdot T}, \quad (5.36)$$

де S_b – відпускна ціна базової машини, грн.

Питома металомісткість машини:

– для нової машини:

$$M_n = \frac{\sigma_{zn}}{Q_n}, \quad (5.37)$$

де σ_{zn} – маса нової машини в зборі, кг;

– для базової машини:

$$M_b = \frac{\sigma_{zb}}{Q_b}, \quad (5.38)$$

де σ_{zn} – маса базової машини в зборі, кг.

Річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах під час використання розробленої вібраційної машини:

$$E_r = (Q_n - Q_b) \cdot (U_b - U_n). \quad (5.39)$$

Термін окупності капіталовкладень на розробку вібраційної машини:

$$T_{ок} = \frac{S_n}{E_r}. \quad (5.40)$$

Отримані результати економічного розрахунку вібраційної машини в порівнянні з базовою машиною заносимо до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Результати економічного розрахунку розробленої вібраційної машини в
порівнянні з базовою машиною

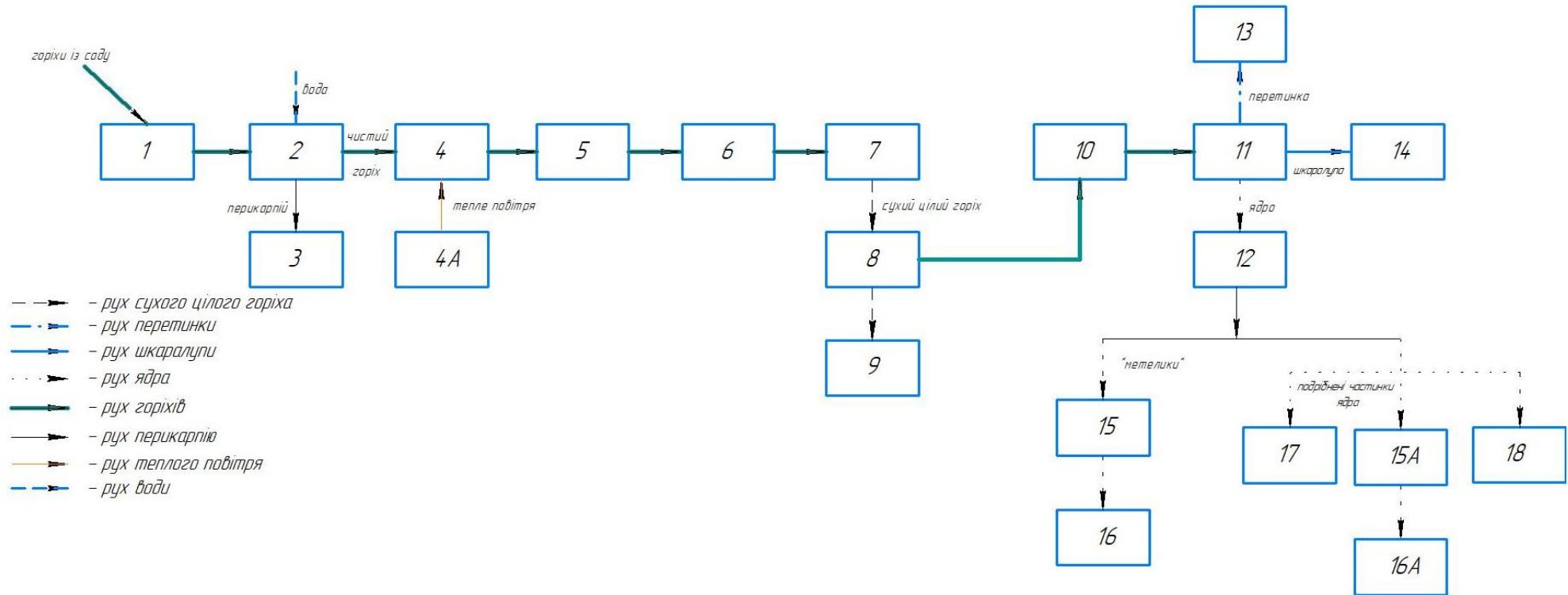
Показники	Машина	
	Нова	Базова
1	2	3
Оптова ціна нової машини з урахуванням ПДВ, грн	$3,735 \cdot 10^5$	-
Відпускна ціна нової машини з урахуванням торговельної націнки посередницької організації, яка здійснює продаж техніки, грн.	$4,183 \cdot 10^5$	-
Основна заробітна плата працівників, грн/кг	0,652	2,934
Відрахування на додаткову оплату, які враховують витрати на оплату чергових і додаткових відпусток, грн.	0,15	0,675
Відрахування на оплату праці працівників, грн/кг	0,802	3,609
Відрахування на соціальні потреби, грн/кг	0,176	0,794
Амортизаційні відрахування на реновацію машини, грн/кг	0,2	0,235
Витрати на енергоресурси для приводу машини, грн/кг	1,637	1,25
Витрати на зберігання машини, грн/кг	$2,178 \cdot 10^{-3}$	$4,083 \cdot 10^{-3}$
Відрахування на експлуатаційні матеріали, грн/кг	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$3,25 \cdot 10^{-4}$
Повна собівартість робіт, грн/кг	3,017	6,127
Експлуатаційні витрати на машину, грн/кг	2,817	5,892
Питомі капіталовкладення на експлуатацію машини, грн/кг	2,324	2,733
Питома металомісткість машини, кг/кг	$5,333 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
Річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах під час використання нової машини, кг	$1,845 \cdot 10^5$	-
Термін окупності капіталовкладень, років.	2,2	-

5.2 Місце вібраційної машини в технологічній схемі переробки волоських горіхів

При складанні технологічної лінії найбільш затратим та енергоємним є процес сушіння. Розроблена вібраційна машина з об'ємом сушильної камери 4,2 м³ є однією із ключових машин для якісного та енергоефективного процесу сушіння [114, 115].

Технологічна лінія переробки волоських горіхів призначена для комплексної переробки з метою отримання високоякісного харчового продукту, а також сировини для інших галузей народного господарства. В себе вона включає сукупність машин безперервної та періодичної дії, які узгоджені в єдиному технологічному процесі [33, 57].

На рис. 5.1. показана схема технологічної лінії для післязбиральної обробки волоських горіхів. Технологічний процес післязбиральної переробки волоських горіхів починається з бункера-накопичувача 1, де відбувається приймання сировини з саду, після чого горіхи підвищеної вологості з частинками ґрунту та перикарпію потрапляють у відділенню пілінгу та мийки 2. Відходи з попереднього технологічного процесу потрапляють на переробку у відділ 3. Після цього відбувається транспортування чистих, вологих, волоських горіхів за допомогою транспортера 4, та геліопідігрівача повітря 5, до бункера-накопичувача 4А. Далі продукт надходить у Дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів 6, яка забезпечує якісне та енергоефективне сушіння волоських горіхів. Висушені горіхи направляються в бункер-накопичувач 7, а розподіл цілих горіхів за фракціями (згідно розмірів) відбувається на калібраторі 8, найбільші горіхи надходять на дальнішу переробку, а саме розколювання 10. Волоські горіхи меншої фракції направляються на фасування цілого горіха 9. Розколені горіхи спрямовуються на сепаратор 11, після чого машина 12 здійснює калібрування ядра за якісними показниками. Ядра волоських горіхів спрямовуються на вакуумування 15 та пакувальний стіл 16, а відповідно половинки та подрібнені частини вакуумують та пакують машини 15А, 16А. Переробка перетинки та шкаралупи відбувається за допомогою машини 13, 14. Відповідно переробка на олію та кондитерські вироби відбувається машинами періодичної дії 17, 18.



1 – бункер-накопичувач зібраних горіхів; 2 – відділення пілінгу; 3 – переробка перикарпії; 4 – транспортування чистого волоського горіху із одночасним видаленням зовнішньої вологи; 4А – бункер накопичувач; 5 – геліопідігрівач повітря; 6 – дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів; 7 – бункер-накопичувач цілих горіхів; 8 – калібратор; 9 – фасування цілого горіха;

10 – горіхокол; 11 – сепаратор; 12 – калібрування ядра; 13 – переробка перетинки; 14 – переробка шкаралупи; 15 – вакуумування; 15А – вакуумування подрібнених частинок ядра; 16 – пакувальний стіл; 16А – пакувальний стіл для подрібнених частин; 17 – переробка на олію; 18 – переробка на кондитерські вироби.

Рисунок 5.1 – Схема технологічної лінії переробки волоських горіхів

5.3 Виробнича апробація результатів досліджень

Згідно з актами про впровадження та виробничу перевірку (додатку Є) з підприємствами ТОВ «Агромаш-Калина» та ПП «ЯФК-ВІТОН» за результатами теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено та виготовлено вібраційну машину для сушіння волоських горіхів.

В ході перевірки здійснено аналіз основних параметрів роботи вібраційної машини, що включає визначення параметрів теплоносія, амплітудно-частотних характеристик, споживаної енергії та ефективності процесу сушіння. У ході випробувань встановлено, що при амплітуді коливань $A = 6,5$ мм та частоті коливань сушильної камери $f = 16$ Гц, швидкості теплоносія $V = 22,5$ м/с, при температурі $t = 38$ °С відбувається мінімізація енергетичних витрат, що підтверджується розрахунками потужності привода віброзбуджувача, електронагрівача повітря та вентилятора подачі теплоносія. Також було підтверджено, що при даних технологічних параметрах обладнання відбувається зниження вологості з $W_{\text{п}} = 28\%$ до $W_{\text{к}} = 10\%$ при отриманні продукту належної якості.

При цьому забезпечувалась продуктивність по матеріалу $\Pi = 126,7$ кг/год, витрата енергії на випаровування одного кілограма вологи становила $3,91$ МДж/кг.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що ефективна робота вібраційної машини досягається за умов збалансованого поєднання вказаних технологічних параметрів теплоносія, амплітудно-частотних характеристик сушильної камери, споживаної енергії та ефективності процесу сушіння.

5.4 Висновки до п'ятого розділу

1. Результати техніко-економічного оцінювання розробленої вібраційної машини для сушіння волоських горіхів засвідчили, що провадження такої машини у виробництво дає змогу отримати річний економічний ефект

184500 грн/рік в порівнянні з існуючою сушаркою для сушіння волоських горіхів. Середній термін окупності 2,2 роки.

2. Визначено місце вібраційної машини в технологічній схемі переробки волоських горіхів та виконано апробацію результатів досліджень.

3. Визначено, що інтенсифікація процесу сушіння за допомогою вібраційного впливу на шар горіхів інтенсифікує процес сушіння та значно зменшує енергозатрати над технологічним процесом післязбиральної переробки волоських горіхів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [57].

1. 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.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане наукове завдання зменшення енергетичних витрат при забезпеченні встановлених показників якості сушіння волоських горіхів шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини. За результатами досліджень зроблено такі висновки:

1. На основі аналізу існуючих машин для сушіння волоських горіхів, результатів теоретичних та експериментальних досліджень, запропоновано застосування вібраційного впливу на шар горіхів для інтенсифікації процесу сушіння. Розроблена принципова схема вібраційної машини для сушіння горіхів, підібрано обладнання для реалізації процесу.

2. Розроблена математична модель процесу сушіння, яка дозволяє визначати температуру ядра горіха в залежності від початкових умов і технологічних параметрів процесу. Горіх представлений геометричною фігурою «куля в сфері» з негативними внутрішніми джерелами тепла. Математична модель отримана шляхом аналітичного розв'язання рівняння нестационарної теплопровідності з використанням перетворення Лапласа.

3. Розроблена методика і проведені дослідження по визначенню фізико-механічних властивостей горіхів. Характерним розміром горіху є еквівалентний діаметр 34,87 мм, сферичність становить 91,08%. Ці дані свідчать про правомочність представлення форми горіху як «куля в сфері». Результати визначення теплофізичних властивостей горіхів показують ідентичність залежностей з іншими рослинними матеріалами через однакову форму зв'язку вологи з матеріалом – колоїдні капілярно-пористі тіла.

4. Розроблена і виготовлена лабораторна модель та дослідно-промисловий зразок вібраційної машини. Встановлена потужність електрообладнання 27,5 кВт, в тому числі вентилятора – 1,5 кВт, обладнання для реалізації вібраційного впливу – 4 кВт, три групи теплонагріваючих елементів – дві по 6 кВт і третя група – 10 кВт. Третя група теплонагріваючих елементів є резервною, а перші дві групи працювали постійно.

5. Проведені експериментальні дослідження підтвердили гіпотезу про доцільність застосування вібраційного впливу для інтенсифікації процесу сушіння. Коефіцієнт теплообміну із застосуванням вібраційного впливу більше такого ж без нього на 20...27% при однакових значеннях температури і швидкості сушильного агенту. Висунута гіпотеза, яка (при подальших ґрунтовних дослідженнях) може пояснити причину виникнення цього явища.

6. Розроблена методика та проведені дослідження по визначенню раціональних технологічних параметрів. Аналіз отриманого рівняння регресії дозволив визначити раціональні технологічні параметри: температура сушильного агенту 38⁰С, його швидкість 22,5 м/с, віброприскорення сушильної камери 65,6 м/с² при постійній амплітуді її коливань 6,5 мм.

7. Перевірка адекватності математичної моделі показала розбіжність між теоретичними та експериментальними даними не більше 11%, а проведена статистична оцінка відповідності теоретичних та експериментальних даних показала що середнє відхилення між моделлю та експериментом становить лише 5%, тобто теоретична модель добре апроксимує експериментальний процес сушіння, що свідчить про доцільність застосування розробленої математичної моделі для дослідження процесу сушіння волоських горіхів.

8. Виробнича перевірка вібраційної машини для сушіння волоських горіхів засвідчила ефективність застосування вібраційного впливу для інтенсифікації процесу сушіння. Основний показник енергетичної ефективності роботи сушарки - затрати енергії на випаровування 1 кг вологі - становив 3,91 МДж/кг, що на 12...15% менше ніж у сучасних конвективних сушарок сільськогосподарського призначення. Результати техніко-економічної оцінки експериментальної вібраційної машини для сушіння волоських горіхів засвідчили її перевагу над базовою сушаркою і показують, що реалізація процесу сушіння за допомогою вібраційного впливу на шар горіхів інтенсифікує процес сушіння та значно зменшує енергозатрати технологічного процесу післязбиральної переробки волоських горіхів. Річний економічний ефект становить 184 500 грн, а термін окупності капіталовкладень – 2,2 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shahidi F., Ambigaipalan P. Nuts and seeds in health and disease prevention. 2nd ed. London: Academic Press, 2020. 724 p. URL: https://www.academia.edu/99074209/Nuts_and_Seeds_in_Health_and_Disease_Prevention
2. Pop I.D., Pamfil D., Botu M., Achim G., Baciuc A. Genetic diversity in walnut (*Juglans regia* L.) revealed by simple sequence repeat markers. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2013. Vol. 41, № 2. P. 372-378. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126830>
3. Prasad R.B.N. Walnuts and pecans. In: *Encyclopedia of Food and Health*. Oxford: Academic Press. 2016. P. 486-491.
4. Oliveira I., Sousa A., Ferreira I. C.F.R., Bento A., Estevinho L., Pereira J.A. Total phenols, antioxidant potential and antimicrobial activity of walnut (*Juglans regia* L.) green husks. *Food and Chemical Toxicology*. 2008. Vol. 46 (7). P. 2326-2331. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18448225/>
5. Carvalho M., Ferreira P.J., Mendes V.S., Silva R., Pereira J.A., Jerónimo C., Silva B.M. Human cancer cell antiproliferative and antioxidant activities of *Juglans regia* L. *Food and Chemical Toxicology*. 2010. Vol. 48 (1). P. 441-447. DOI: [10.1016/j.fct.2009.10.043](https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.10.043)
6. Savage G.P. Chemical composition of walnuts (*Juglans regia* L.) grown in New Zealand. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2001. Vol. 56 (1). P. 75-82. DOI: [10.1023/A:1008175606698](https://doi.org/10.1023/A:1008175606698)
7. Anderson K.J., Teuber S.S., Gobeille A., Cremin P., Waterhouse A.L., Steinberg, F. M. Walnut polyphenolics inhibit in vitro human plasma and LDL oxidation. *Journal of Nutrition*. 2001. Vol. 131(11). P. 2837-2842. DOI: [10.1093/jn/131.11.2837](https://doi.org/10.1093/jn/131.11.2837)
8. Jahanban-Esfahlan A., Ostadrahimi A., Tabibiazar M., Amarowicz R. Bioactive plant compounds in walnuts and their health benefits. *Nutrition*. 2019. Vol. 57. P. 141-147. DOI: [10.3390/ijms20163920](https://doi.org/10.3390/ijms20163920)

9. Ma Y., Njike V.Y., Millet J., Dutta S., Doughty K., Treu J. A., Katz D.L. Effects of walnut consumption on endothelial function in type 2 diabetic subjects: a randomized controlled crossover trial. *Diabetes Care*. 2010. Vol. 33 (2). P. 227–232. DOI: [10.2337/dc09-1156](https://doi.org/10.2337/dc09-1156)
10. Reiter R.J., Tan D.X., Galano A. Melatonin: exceeding expectations. *Physiology*. 2014. Vol. 29 (5). P. 325-333. DOI: [10.1152/physiol.00011.2014](https://doi.org/10.1152/physiol.00011.2014)
11. Tapsell L.C., Batterham M.J., Teuss G., Tan S.Y., Dalton S., Quick C. J., Gillen L.J., Charlton K.E. Long-term effects of increased dietary polyunsaturated fat from walnuts on metabolic parameters in type II diabetes. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2009. Vol. 63 (8). P. 1008-1015. DOI: [10.1038/ejcn.2009.19](https://doi.org/10.1038/ejcn.2009.19)
12. Ros E. Health benefits of nut consumption. *Nutrients*. 2010. Vol. 2 (7). P. 652-682. DOI: [10.3390/nu2070652](https://doi.org/10.3390/nu2070652)
13. Hayes D., Angove M.J., Tucci J., Dennis C. Walnuts (*Juglans regia*) chemical composition and research in human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. Vol. 56 (8). P. 1231-1241. DOI: [10.1080/10408398.2012.760516](https://doi.org/10.1080/10408398.2012.760516)
14. Vu D.C., Vo P.H., Coggeshall M.V., Lin C.H. Identification and characterization of phenolic compounds in black walnut kernels. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2018. Vol. 73 (3). P. 266-272. DOI: [10.1021/acs.jafc.8b01181](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01181)
15. Esfahlan A. J., Jamei R., Esfahlan R. J. The importance of walnut and its by-products in human nutrition and health. *International Journal of Molecular Sciences*. 2010. Vol. 11 (11). P. 4442-4460.
16. Li L., Tsao R., Yang R., Liu C., Zhu H., Young J.C. Polyphenolic profiles and antioxidant activities of heartnut (*Juglans ailanthifolia* var. *cordiformis*) and Persian walnut (*Juglans regia* L.) husks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006. Vol. 54 (21). P. 8033-8040. DOI: [10.1021/jf0612171](https://doi.org/10.1021/jf0612171)
17. Sheng H., Sun H., Xu W., Dong Y., Zhou J., Liu Q. Juglone: a novel therapeutic agent from *Juglans regia* L. with anticancer properties. *Journal of Ethnopharmacology*. 2020. Vol. 260. P. 112-138.

18. Grebenstein N., Frank J. Antioxidants in nuts and their impact on human health: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2012. Vol. 52 (4). P. 310-326.
19. Reeve R.M., Labuckas D.O., Maestri D.M., Guzmán C.A. Morphological aspects and chemical composition of walnut seeds from different regions of Argentina. *Ciencia e Investigación Agraria*. 2008. Vol. 35 (2). P. 145-150.
20. Durrani A. I., Adeel S., Saleem H. Walnut husk: a sustainable source of natural dyes for textile coloration. *Journal of Natural Fibers*. 2021. Vol. 18 (12). P. 1730–1742.
21. Martínez M.L., Maestri D., Labuckas D.O. Walnut: composition, health benefits and commercial value. *Food Research International*. 2020. Vol. 137. P. 109-356. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109356.
22. International Nut and Dried Fruit Council (INC). Statistical Yearbook 2022/23. Reus, Spain: INC, 2023. 212 p. URL: [Statistical-Yearbook-2022-2023.pdf](#)
23. USDA Foreign Agricultural Service. Tree Nuts: World Markets and Trade. Washington, DC: USDA, 2023. 45 p.
24. Кондратенко Т.Є., Бублик О.М., Сорока Л.М. Сортові особливості та перспективи розвитку горіхівництва в Україні. *Садівництво*. 2021. Вип. 75. С. 45–52.
25. Martínez M., Valdés A., Garrido I. Global trends in nut consumption and health implications. *Nutrients*. 2020. Vol. 12, № 9. P. 2685. DOI: 10.3390/nu12092685.
26. GlobalG.A.P. Integrated Farm Assurance (IFA) Standard v5.4-1. Cologne: FoodPLUS GmbH, 2022. 156 p.
27. ISO 22000:2018. Food safety management systems – Requirements for any organization in the food chain. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 32 p.
28. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Степаненко С. П. Технологія зберігання та переробки плодоовочевої продукції: навч. посіб. Київ: Вища освіта, 2017. 412 с.

29. Любін М. В., Гунько І. В. Конвеєри з гнучким тяговим елементом: навч. посіб. Київ: Хай-Тек Прес, 2012. 272 с.
30. Shuo W., Rui P., Zhong X., Fengping H., Jianxin F., Shuquan H. Design on key parameters of macadamia nut peeling device. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*. 2021. Vol. 42 (9). P. 107-113. DOI: [10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2021.09.15](https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2021.09.15)
31. Мазур В. Г., Войтюк Д. Г., Соколенко В. М. Сучасні технології сушіння сільськогосподарської продукції: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 356 с.
32. Кухарець С. М., Савчук В. П., Кирилюк В. В. Технологія сушіння та зберігання горіхоплідних культур. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 9. С. 92–99.
33. ДСТУ 8900:2019. Горіхи волоські. Технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 16 с.
34. Mujumdar A.S. (Ed.). Handbook of Industrial Drying. Boca Raton: CRC Press, 2020. 742 p. DOI: 10.1201/9780429289774.
35. Цуркан О. В., Руткевич В. С., Дідик А. М. Теоретичні дослідження процесу сушіння волоських горіхів з використанням вібраційних технологій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 4, № 323. С. 337–342. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342.
36. Kaletnik H., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prysiazhniuk D., Didyk A. Substantiation of the operating parameters of walnut drying equipment. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11(2). P. F27–F34. DOI: [10.21272/jes.2024.11\(2\).f4](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).f4).
37. Цуркан О.В. Системний підхід до вивчення технології післязбиральної обробки насіння гарбуза. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4(115). С. 141–147. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-16
38. Цуркан О.В., Спирін А.В., Гудзенко Н.М., Дідик А.М. Математична модель процесу сушіння волоських горіхів у конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4(115). DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-1
39. Мелейчук В.М. Тепломасообмін у технологічних процесах харчової промисловості. Суми: СумДУ, 2018. 284 с. URL:

<https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/af8f5dd2-6cff-40df-becf-5d02e11f98ef/content>

40. Костюк Г.І. Теоретичні аспекти підвищення ефективності сушіння зернових матеріалів. Вісник ХНТУСГ. 2020. № 212. С. 45–52.
41. Kaletnik H., Yaropud V., Kupchuk I., Aliiev E., Babyn I., Lavreniuk P. Modeling of the technological process of walnut drying in a convective dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99(12). P. 91–97. DOI:10.15199/48.2023.12.17:
42. Kudra B., Ratti C. Process intensification in drying of biomaterials. *Chemical Engineering and Processing*. 2016. Vol. 108. P. 24–32. DOI: 10.1016/j.cep.2016.06.011.
43. Fellows P. J. Food Processing Technology: Principles and Practice. 4th ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. 1152 p.
44. Baroni S., Larsson H. Innovations in walnut drying and storage: energy saving and quality preservation. *Journal of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 51, № 3. P. 145–153.
45. Gálvez F., Aranda M., López A. Influence of drying temperature on quality of in-shell walnuts. *Food Control*. 2018. Vol. 91. P. 193–201.
46. Fijalkowska A., Nowak D. Freeze-drying of plant materials: applications and challenges. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 5. P. 2267–2279.
47. Yildiz C., Izli G. Effect of infrared drying on drying kinetics and physicochemical properties of nuts. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2019. Vol. 13. P. 2515–2524.
48. Vega-Gálvez A., López J., Lemus-Mondaca R. Microwave-assisted drying of agricultural products: energy and quality assessment. *Journal of Food Engineering*. 2012. Vol. 110. P. 294–301.
49. Cao H., Zhang M., Mujumdar A. Hybrid drying technologies: principles, applications and prospects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. Vol. 61, № 7. P. 1145–1160.

50. Li H., Han X., Liu Y. Effects of vibration-assisted convective drying on drying kinetics and product quality of plant materials. *Drying Technology*. 2023. Vol. 41, № 2. P. 267–278.
51. Kudra T., Mujumdar A. S. *Advanced Drying Technologies*. 2nd ed. New York: CRC Press, 2009. 456 p.
52. Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*. 2001. Vol. 49, №4. P. 311–319.
53. Cokluk E., Yildiz G., Ertekin C. Investigation of walnut drying characteristics and modeling of drying curves. *Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 53, № 9. P. 2909–2919.
54. Руткевич В.С., Дідик А.М. Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкаралупі. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2023. № 1 (317). С. 230-236. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>
55. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W., Deng L., Meng X., Pan Z. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 285 (8). P. 110-105.
56. Silva P.C., Resende O., Ferreira Junior W.N., Silva L.C.M., Quequeto W.D., Silva F.A.S. Drying kinetics of Brazil nuts. *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 42. Code. e64620. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.64620>.
57. 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.
58. Arslan D., Özcan M. M. Drying of walnuts and quality assessment under infrared-convective conditions. *LWT Food Science and Technology*. 2011. Vol. 44, № 4. P. 1011–1016.
59. Chen C., Pan Z. Heat and moisture transfer studies on walnuts during hot air drying in a fixed-bed column dryer. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 199 (2). Code. 117554 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117554>

60. Ghanbarian D., Khazaei J., Abbaspour-Fard M. H. Microwave-assisted drying of walnut kernels: kinetics and quality parameters. *Drying Technology*. 2013. Vol. 31, № 8. P. 964–973.

61. Chena C., Weipeng Z., Venkitasamy C., Khira R., McHughc T., Pan Z. Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics. *Drying Technology*. 2019. Vol. 38 (8). P. 975-986. DOI: [10.1080/07373937.2019.1605610](https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1605610)

62. Сушильна машина для горіха [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rozetka.com.ua/ua/346831077/p346831077/> (дата звернення: 22.09.2025).

63. Сушильна машина для горіха [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kadmec.com.ua/uk/orehi-2-ua/sushilnaja-mashina-dlja-oreha-ua/> (дата звернення: 22.09.2025).

64. Сушилка для горіха [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p2249337568-sushilka-dlya-oreha.html> (дата звернення: 22.09.2025).

65. Сушильні лінії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uasushka.com/ua/sushilni-linii.html> (дата звернення: 22.09.2025).

66. Шафа сушильна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uasushka.com/ua/shafa-sushilna.html> (дата звернення: 22.09.2025).

67. Сушильний комплекс SVG для волоських горіхів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agro-ukraine.com/ru/trade/m-1144663/sushilnij-kompleks-svg-sushka-dlya-voloskikh-gorikhiv-ta-funduka/> (дата звернення: 22.09.2025).

68. Котов Б. І. Аналіз тенденцій підвищення паливно-енергетичної ефективності зерносушарок. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету*. 2001. Вип. 10. С. 227–232.

69. Chen C., Pan Z. Processing of Tree Nuts. Postharvest Technology - Recent Advances, New Perspectives and Applications. *IntechOpen*. 2022. P. 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102623>

70. Ланець О. С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин (Кн. 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом

робочого органу): навч. посіб. Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2018. 600 с.

71. Полевода Ю. А., Твердохліб І. В. Використання комбінованих методів сушіння у харчових технологіях. *Харчова наука і технологія*. 2020. Т. 14, №1. С. 45–53.

72. FAO. Walnut production and postharvest management [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fao.org> (дата звернення: 10.09.2025).

73. Калетнік Г.М., Цуркан О.В. Особливості конструкції вібраційного обладнання для сушіння високовологої насінневої сировини. *Віб्राції в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 5-13. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-1

74. Спірін А.В., Цуркан О.В., Твердохліб І.В., Борисюк Д.В. Вплив вібрації на ергономічні показники виробничого процесу. *Віб्राції в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 45-56. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-5

75. Цуркан О.В., Спірін А.В., Твердохліб І.В. Визначення теплофізичних характеристик об'єктів вібраційного сушіння. *Віб्राції в техніці та технологіях*. 2021. № 3 (102). С. 100-108. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-11

76. Мазур В. Г., Войтюк Д. Г., Соколенко В. М. Сучасні технології сушіння сільськогосподарської продукції: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 356 с.

77. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W., Khir R., Upadhyaya S., Pan Z. Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 150 (1). P. 119-283 DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283)

78. Цуркан О.В. Обґрунтування раціонального способу та обладнання для сушіння високовологого насіння баштанних культур. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2022. № 1 (305). С. 240-246. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-240-246

79. Хижняк В. П., Марченко І. В. Основи масообміну і теплотехнічні процеси в агропромисловому виробництві: навч. посіб. Харків: ХНАУ, 2016. 412 с.

80. Mujumdar A. S. (Ed.). Handbook of Industrial Drying. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 1312 p.

81. Цуркан О.В. Аналіз вібраційних технічних засобів для сушіння насіння гарбуза. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (103). С. 5-14. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-4-1

82. Doymaz I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of walnut kernels. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017. Vol. 41, № 5. Code e12949.

83. 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.

84. Zheng W., Yang J., Gao W. Effect of combined infrared and vibration drying on drying kinetics and quality of agricultural products. *Drying Technology*. 2022. Vol. 40, № 6. P. 1190–1202.

85. Ланець О. С., Майструк П. І. Вібраційні машини та процеси: навч. посіб. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2020. 488 с.

86. Gurevich V., Ivanov D., Makarov P. Intensification of drying processes using vibration technologies. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 150. P. 984–992.

87. Траченко Л.М. Комбіновані методи сушіння рослинної сировини: сучасний стан та перспективи розвитку. *Наукові доповіді НУБІП України*. 2021. Вип. 25. С. 73–80.

88. Mastruk P., Lanets O., Maystruk V. Determining the influence of continuous section shape and dimensions on stresses over a wide range of vibration frequency. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2024. Vol. 10, № 4. С. 57–74.

89. Руткевич В. С., Цуркан О. В., Спірін А. В., Дідик А. М. Свідectwo про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема

конвективно-вібраційної сушарки». – Свідоцтво №128825 від 02.08.2024; заяв. №с202405407 від 20.06.2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1821758/>

90. Руткевич В. С., Цуркан О. В., Спірін А. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів». Свідоцтво №130915 від 29.10.2024; заяв. №с202408113 від 01.10.2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1830970/>

91. Руткевич В. С., Цуркан О. В., Спірін А. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема конвективно-вібраційної сушарки волоських горіхів». Свідоцтво №130914 від 29.10.2024; заяв. №с202408114 від 01.10.2024. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1830970/>

92. Цуркан О. В., Спірін А. В., Твердохліб І. В., Дідик А. М. Обґрунтування способу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2 (109). С. 5–11. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-21.

93. Цуркан О. В., Спірін А. В., Руткевич В. С., Дідик А. М. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 2 № (333). С. 393-399. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-61

94. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Степаненко С.П., Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): Монографія. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М. 2017. 552 с.

95. Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Оцінка ефективності процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 5-12. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1

96. Котов Б.І., Лісецький В.О. Аналіз впливу режимів сушіння на енергетичні характеристики зерносушарок. *Вісник ХДТУСГ*. Харків. 2001. Т. 1. Вип. 8. С. 166-170.
97. Kaviany M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. 2nd ed. New York: Springer, 2012. 708 p.
98. Полєвода Ю.А., Твердохліб І.В. Визначення фізико-механічних параметрів шкаралупи волоського горіха. *Вібрація в техніці та технологіях*. 2019. № 2 (93). С.12-17. DOI:10.37128/2306-8744-2019-2-2.
99. Спірін А., Грицун А., Флеш Р. Сушарка для зерна. *Техніка АПК*. 1998. № 2. С.19-20.
100. Осокіна Н.М., Костецька К.В. Фізичні і теплофізичні властивості овочів залежно від сорту та ступеня стиглості. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2013. Вип. 83. С. 38-43
101. Hahn D.W., Özisik M.N. Heat Conduction and Mass Transfer. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. – 744 p.
102. Ozisik M.N. Heat Conduction. New York: John Wiley & Sons, 1980. 465 p.
103. Agarwal P., Kumar N., Singh S. Exponential heat source in spherical coordinate systems. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. Vol. 170. Article 107111.
104. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. New York: John Wiley & Sons, 2011. 1024 p.
105. Lienhard J.H., Lienhard J.H. V.A Heat Transfer Textbook. 5th ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2020. 932 p.
106. Bai T., Xie D., Li Q. Modeling of unsteady heat conduction in porous spheres with time-dependent internal heat generation. *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 204. Article 117957.
107. Guzzo V., Panno A. Numerical analysis of transient heat transfer with internal heat sinks in multiphase materials. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. Vol. 38. Article 101625.

108. Мелейчук С.С., Арсеньєв В.М., Івченко О.В. Тепломасообмін: навчальний посібник. Суми: Сумський державний університет, 2023. 176 с.

109. Як правильно сушити горіхи [Електронний ресурс].- Режим доступу: <http://fakty.ua/408294> (дата звернення 12.02.2024)

110. Массалітіна Є.В., Кільчинський О.О. Операційне числення. Теорія та методика розв'язання задач. Методичний посібник для студентів технічних спеціальностей посібник. Київ: НТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» 2018. 90 с.

111. Погожих М.І., Пак А.О. Енергоефективність процесу сушіння: шляхи вирішення. *Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини. Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції.* Харків.-Державний біотехнологічний університет. 08.06.2023. С. 39-40.

112. Цуркан О.В., Спірін А.В., Гудзенко Н.М., Дідик А.М. Математична модель процесу сушіння волоських горіхів в конвективно-вібраційній сушарці. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2024. № 4 (115). С. 5-14. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-1

113. Полєвода Ю. А. Дослідження процесу лущення волоських горіхів між двома паралельними пластинами. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2019. № 3 (94). С. 110-117. DOI: 10.37128/2306-8744-2019-3-14

114. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Дідик А.М., Руткевич В.С. Конвективно-вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів: пат. 157612 Україна: МПК F26B 17/10 (2006.01); № и 2024 01129; заявл. 01.03.2024; опубл. 21.08.2024. Бюл. № 34. 10 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1815359/>

115. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Дідик А.М., Руткевич В.С. Конвективно-вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів: пат.159033 Україна: МПК F26B 17/10 (2006.01); № и 2024 04771; заявл. 04.10.2024; опубл. 16.04.2025. Бюл. № 16. 9 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1851703/>

116. Ercisli S., Sayinci B., Kara M., Yildiz C., Ozturk I.. Determination of size and shape features of walnut (*Juglans regia* L.) cultivars using image processing. *Scientia Horticulturae*. 2012. 133, 47–55.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.014>

117. Sarker M. S. H., Ibrahim M. N., Abdul Rahman R. Energy consumption and modeling of microwave-convective drying of food products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 45. P. 1–11.

118. Цуркан О. В., Спірін А. В., Дідик А. М., Бондаренко М. П. Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). С. 52–59. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7.

119. Цуркан О.В. Передумови для побудови математичної моделі процесу фільтраційного сушіння насіння гарбуза. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 136-141. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-16

120. Економічне сушіння. Журнал «The Ukrainian Farmer» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agrotimes.ua/article/ekonomne-sushinnya/> (дата звернення 22.10.2024)

121. Гільчук А. В., Халатов А. А., Доник Т. В. Теорія теплопровідності. навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 153 с.

122. Дмитрус М. І., Карашевський В. П. Розрахунок двовимірних стаціонарних температурних полів за наявності внутрішніх джерел тепла методом скінченних елементів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т. 27, № 5. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15421/40270527>

123. Сушарка для волоських горіхів [Електронний Режим] – Режим доступу: <https://www.gorihovod.com.ua/sushilka-dlia-gretskogo-oreha-v-skorlupe/> (дата звернення 03.09.2025).

124. Котов Б.І., Спірін А.В., Зозуляк І.А., Півнюк А.В. Розрахунок кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 1 (96). С.96-99.

125. Kotov B., Spirin A., Kalinichenko R., Bandura V., Polievoda Y., Tverdokhlib I. Determination the parameters and modes of new heliocollectors

constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*. 2019. 65(1). P. 20-24. DOI:10.17221/73/2017 – RAE

126. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4 (94) P.50-58. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139314

127. Kaletnik G., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Prysiazniuk D. Didyk A. Substantiation of the Operating Parameters of Walnut Drying Equipment. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. 2024. Vol. 11, Issue 2. P. F27–F35. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).f4

128. ДСТУ 4397:2005 Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (дата звернення 18.08.2025)

129. Янович В.П., Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Економічна ефективність використання віброозонуючої сушарки в технологічному процесі сушіння зерна. Всеукраїн. наук.-практ. конф. «Сучасні моделі розвитку агропромислового виробництва: виклики та перспективи», Глухів. агротехн. і-т ім. С. А. Ковпака Сумського НАУ. Глухів, 2018. Вип. 1. С. 316-321.

ДОДАТКИ

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Дідика Андрія Михайловича
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

№ п/п	Назва	Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від інших	Кількість друкованих сторінок / др. арк.	Співавтори
1	2	3	4	5
Стаття у науковому фаховому виданні віднесеної до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science Core Collection:				
1.	Substantiation of the Operating Parameters of Walnut Drying Equipment	<i>Journal of Engineering Sciences.</i> 2024. Vol. 11(2). DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).f4 URL: https://jes.sumdu.edu.ua/substantiation-of-the-operating-parameters-of-walnut-dryingequipment/	<u>P. 27-35.</u> 0,9 (0,15)	Kaletnik G., Tsurkan O., Spirin A., Gudzenko N., Przyaszniuk D.
Статті у наукових фахових виданнях України категорії Б				
2.	Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкаралупі	<i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.</i> 2023. Т.1. № 1 (317). DOI: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236 URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?p=16770	<u>C. 230-236</u> 0,76 (0,38)	Руткевич В.С.
3.	Обґрунтування способу сушіння волоських горіхів	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> № 2 (109). DOI: 10.37128/2306-8744-2023-21 URL: http://vibrojournal.vsau.org/en/particles/justification-of-the-method-of-drying-walnuts	<u>C. 5-11</u> 0,91 (0,23)	Цуркан О.В., Спирін А.В., Твердохліб І.В.
4.	Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів	<i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.</i> 2024. № 2 (333). DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-61 URL: https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/166	<u>C. 393-399</u> 0,8(0,2)	Цуркан О.В., Спирін А.В., Руткевич В.С.
5.	Теоретичні дослідження процесу сушіння волоських горіхів з використанням вібраційних технологій	<i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.</i> Т. 4. № 323. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-337-342 URL: https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2023/09/323-337-342.pdf	<u>C. 337-342</u> 0,55(0,18)	Цуркан О.В., Руткевич В.С.

Продовження додатку А

1	2	3	4	5
6.	Технологія переробки волоських горіхів	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2024. № 2 (113). DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-1 URL: http://vibrojournal.vsau.org/en/particles/walnut-processing-technology	<u>С. 5-13</u> 0,76(0,19)	Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Спірін А.В.
7.	Шляхи підвищення інтенсивності процесу сушіння волоських горіхів	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2024. № 4 (115). DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-7 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2024/y2zfHZLwM6oLuQzfnB06.pdf	<u>С. 52-59.</u> 0,84(0,22)	Цуркан О.В., Спірін А.В., Бондаренко М.П.
8.	Математична модель процесу сушіння волоських горіхів в конвективно- вібраційній сушарці	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2024. № 4 (115). DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-1 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2024/VRBYFHzmz0IKdRBhwXHDe.pdf	<u>С. 5-14.</u> 0,95(0,24)	Цуркан О.В., Спірін А.В., Гудзенко Н.М.
9.	Оцінка ефективності процесу сушіння волоських горіхів в конвективно- вібраційній сушарці	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2024. № 3 (114). DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2024/gbUkNKDzY6CxRLP0z4li.pdf	<u>С. 5-12.</u> 0,85(0,21)	Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С.
Патенти. Об'єкти права інтелектуальної власності				
10.	Конвективно- вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів	Патент на корисну модель № 156940 від 21.08.2024 року, бюл. № 34. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1815359/	10 с.	Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Руткевич В.С.
11.	Конвективно- вібраційна сушарка для сушіння волоських горіхів	Патент на корисну модель № 159033 від 16.04.2025 року, бюл. № 16. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1851703/	9 с.	Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Гончарук І.В., Гудзенко Н.М., Спірін А.В., Присяжнюк Д.В., Руткевич В.С.
12.	Принципова схема конвективно- вібраційної сушарки	Літературний письмовий твір наукового характеру з ескізом № 128825 від 02.08.2024 рок, бюл. № 83 URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1821758/	3 с.	Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спірін А.В.
13.	Принципова схема конвективно- вібраційної сушарки волоських горіхів	Літературний письмовий твір наукового характеру з ескізом № 130915 від 29.11.2024 рок, бюл. № 84 URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1830970/	3 с.	Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спірін А.В.

Продовження додатку А


1	2	3	4	5
14.	Принципова схема конвективної сушарки волоських горіхів	Літературний письмовий твір наукового характеру з ескізом № 130914 від 29.11.2024 рок, бюл. № 84 URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1830970/	3 с.	Руткевич В.С., Цуркан О.В., Спірін А.В.

Усього за темою дисертаційної роботи «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини для сушіння волоських горіхів» опубліковано 14 наукових праць загальним обсягом 7,32 умовн. друк. арк. (власний доробок автора 2,0 умовн. друк. арк.) у тому числі 0,15 умовн. друк. арк. у наукометричній базі Scopus; 1,85 умовн. друк. арк. у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародних наукометричних баз.

Аспірант

 Андрій ДІДИК

Вчений секретар

 Тетяна КОРПАНЮК



« » 2025 р.

**АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ
НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ**
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
Дідика Андрія Михайловича

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, місце, дата проведення
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1.	Обґрунтування схеми машини для сушіння волоських горіхів	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». м. Вінниця. 20-21 жовтня 2022 р.
2.	Обґрунтування конвективно-вібраційного способу сушіння волоських горіхів	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції». м. Вінниця. 19-20 жовтня 2023 р.
3.	Визначення теплофізичних характеристик волоських горіхів	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів». м. Вінниця. 17-18 жовтня 2024 р.

Аспірант



Андрій ДІДИК

Вчений секретар



Тетяна КОРПАНЮК

МП

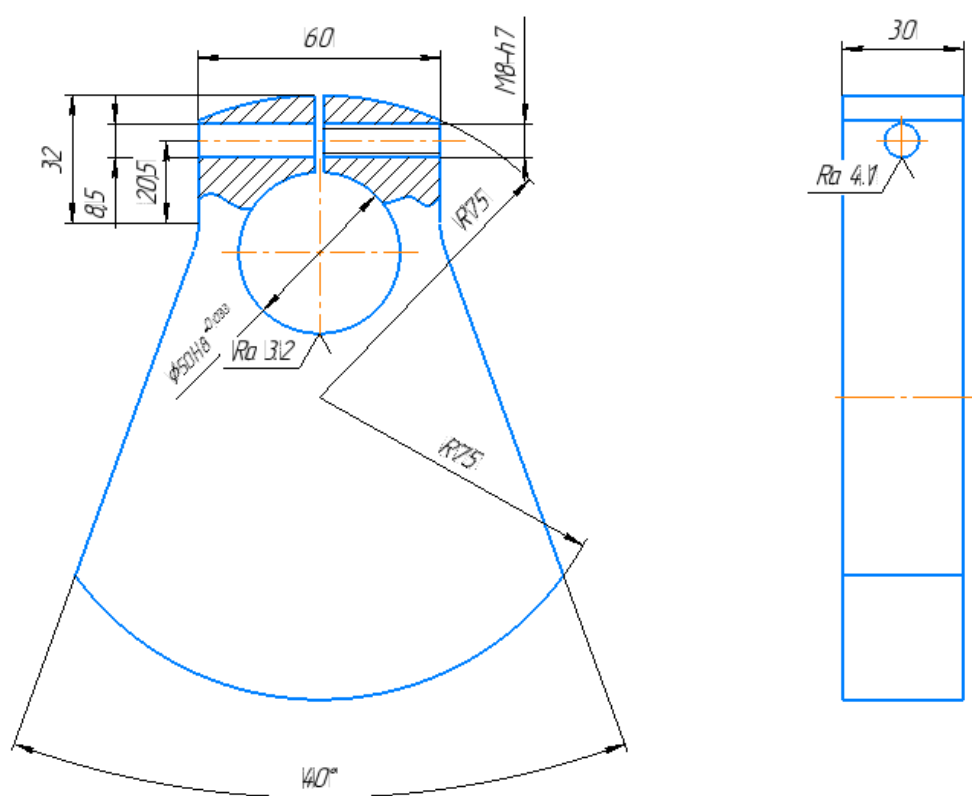
«__» _____ 2025 р.

Додаток В

Отримання розрахункових значень центра ваги дебаланса, його маси, об'єму можна спростити за рахунок використання графічного редактора LibreCAD.

Звідки,

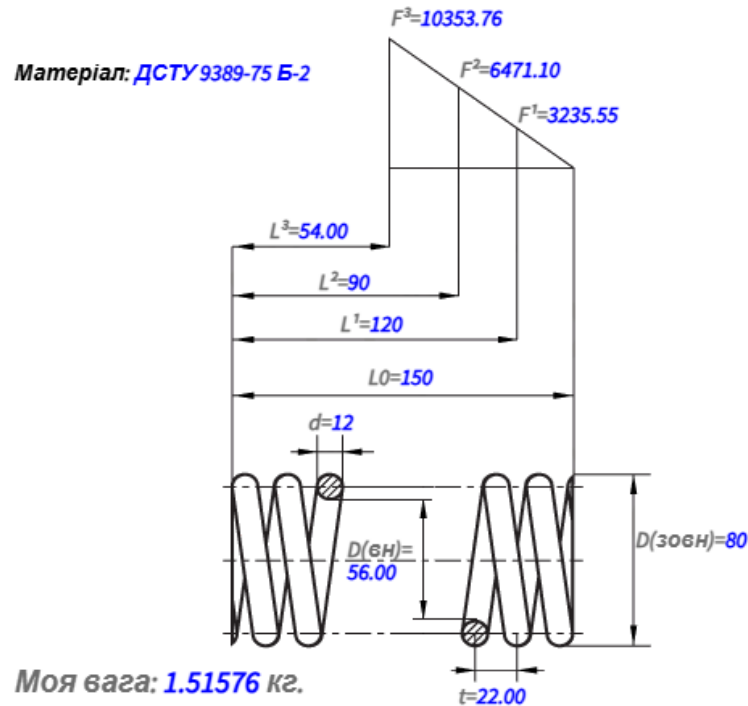
$$F = 8 \cdot 3,5 \cdot 0,082 \cdot 103,1^2 = 24405,6 \text{ Н} .$$



Розрахунок центру ваги дебаланса

Продовження додатку В

Розрахунок пружин підвіски робочої камери вібраційної машини для сушіння волоських горіхів



Варіант оформлення опорних витків	Підігнуті, зашліфовані
Діаметр середній (D зов.)	80,00 мм
Діаметр внутрішній (D внут.)	56,00 мм
Кількість витків (n_1)	8,00 шт.
Попереднє навантаження (F_1)	3235,55 Н
Робоче навантаження (F_2)	6471,10 Н
Максимальне навантаження (F_3)	10353,76 Н
Довжина при змиканні витків (L_3)	54,0 мм
Жорсткість пружини (C)	107,85 Н/мм
Крок (t)	22,0 мм
Розгортка пружини	1708,16 мм
Маса пружини (m_1)	1,52 кг
Вага чотирьох пружин (m_2)	6,08 кг

Дослідно-промисловий зразок вібраційної машини для сушіння волоських горіхів встановлений на 4-ьох віброопорах ОВ-70, що зменшує рівень шуму під час роботи та запобіганню поширенню механічних коливань на підлогу.

Таблиця результатів експерименту

№ п/п	Фактори в безрозмірній системі координат			Фактори в натуральному масштабі			Вихідний параметр
	X_1	X_2	X_3	$X_1/T_{c.a.}$	$X_2/V_{c.a.}$	X_3/α_{ω}	$N_{сер.}$
1	-1	-1	1	30	20	105	3,97
2	1	-1	-1	40	20	25	4,11
3	-1	1	-1	30	26	25	4,21
4	1	1	1	40	26	105	3,21
5	-1	-1	-1	30	20	25	4,53
6	1	-1	1	40	20	105	3,59
7	-1	1	1	30	26	105	3,62
8	1	1	-1	40	26	25	4,01
9	-1,215	0	0	29	23	65	3,97
10	+1,215	0	0	41	23	65	3,82
11	0	-1,215	0	35	19	65	3,91
12	0	+1,215	0	35	21	65	3,87
13	0	0	-1,215	35	23	11	4,02
14	0	0	+1,215	35	23	114	3,41
15	0	0	0	35	23	65	3,77

Вихідні дані для визначення рівняння регресії в програмі *Mathematica 12.0*

$$data1 = \{\{x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni}, y_i\}\},$$

$$data2 = \{\{x_{1i+1}, x_{2i} + 1, \dots, x_{Ni} + 1, y_{i+1}\}\}, \}$$

...

$$datak = \{\{x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Nk}, y_k\}\}.$$

 x_{1i} – фактор y_i – відгук $1 \div N$ – кількість факторів $1 \div k$ – кількість експериментівЧисло факторів $N=3$ Число експериментів $k=15$

$$data1 = \{\{x_{11}=30, x_{21}=20, x_{31}=105, y_1=3.97\}\},$$

$$data2 = \{\{x_{12}=40, x_{22}=20, x_{32}=25, y_2=4.11\}\},$$

$$data3 = \{\{x_{13}=30, x_{23}=26, x_{33}=25, y_3=4.21\}\},$$

$$data4 = \{\{x_{14}=40, x_{24}=26, x_{34}=105, y_4=3.21\}\},$$

$$data5 = \{\{x_{15}=30, x_{25}=20, x_{35}=25, y_5=4.53\}\},$$

$$data6 = \{\{x_{16}=40, x_{26}=20, x_{36}=105, y_6=3.59\}\},$$

$$data7 = \{\{x_{17}=30, x_{27}=26, x_{37}=105, y_7=3.62\}\},$$

$$data8 = \{\{x_{18}=40, x_{28}=26, x_{38}=25, y_8=4.01\}\},$$

$$data9 = \{\{x_{19}=29, x_{29}=23, x_{39}=65, y_9=3.97\}\},$$

$$data10 = \{\{x_{110}=31, x_{210}=23, x_{310}=65, y_{10}=3.82\}\},$$

$$data11 = \{\{x_{111}=35, x_{211}=19, x_{311}=65, y_{11}=3.91\}\},$$

$$data12 = \{\{x_{112}=35, x_{212}=21, x_{312}=65, y_{12}=3.87\}\},$$

$$data13 = \{\{x_{113}=35, x_{213}=23, x_{313}=11, y_{13}=4.02\}\},$$

$$data14 = \{\{x_{114}=35, x_{214}=23, x_{314}=114, y_{14}=3.41\}\},$$

$$data15 = \{\{x_{115}=35, x_{215}=23, x_{315}=65, y_{15}=3.77\}\},$$

 x_1 – температура сушильного агента [$^{\circ}\text{C}$]; x_2 – швидкість сушильного агента [м/с]; x_3 – віброприскорення при фіксованій амплітуді 6,5 мм, [м/с^2]; y – витрати енергії на випаровування 1 кг. вологи [мДж/кг]

Аналіз рівняння регресії для визначення раціональних технологічних параметрів

```
data1={{30,20,105,3.97},{40,20,25,4.11},{38,22.5,65.7,3.4},{30,26,25,4.21},{40,26,105,3.21},{30,20,25,4.53},
,{38,22.5,65.7,3.209},{38,22.5,65.7,3.209},{40,20,105,3.59},{30,26,105,3.62},{40,26,25,4.01},{38,22.5,65.7,3.209},
{29,23,65,3.97},{31,23,65,3.82},{35,19,65,3.91},{35,21,65,3.87},{35,23,11,4.02},{35,23,114,3.41},{35,23,65,3.77}}
```

```
{{30,20,105,3.97},{40,20,25,4.11},{38,22.5,65.7,3.4},{30,26,25,4.21},{40,26,105,3.21},{30,20,25,4.53},{38,22.5,65.7,3.209},
{38,22.5,65.7,3.209},{40,20,105,3.59},{30,26,105,3.62},{40,26,25,4.01},{38,22.5,65.7,3.209},{29,23,65,3.97},
{31,23,65,3.82},{35,19,65,3.91},{35,21,65,3.87},{35,23,11,4.02},{35,23,114,3.41},{35,23,65,3.77}}
```

```
mod -> a0 + a x1 + x2b x2 + c x3 + d x1 x2 + f x1 x3 + g x2 x3 +
k x1^2 + l x2^2 + m x3^2;
```

```
In[15]:= ys["BestFit"]
```

```
Out[15]= 23.0655 - 0.345629 x1 + 0.00368219 x1^2 - 1.0204 x2 +
0.00207062 x1 x2 + 0.0200836 x2^2 - 0.00654576 x3 -
0.000110087 x1 x3 - 0.00032114 x2 x3 + 0.0000822649 x3^2
```

```
In[35]:= ys["ParameterErrors"]
```

```
Out[35]= {6.7085, 0.315981, 0.478852, 0.0180935, 0.00435128, \
0.000326651, 0.000544423, 0.00430652, 0.0100457, 0.0000480436}
```

```
ys["ParameterTable"]
```

```
{
{, Estimate, Standard Error, t-Statistic, P-Value},
{a0, 23.0655, 6.7085, 3.43825, 0.00741098},
{a, -0.345629, 0.315981, -1.09383, 0.302441},
{b, -1.0204, 0.478852, -2.13093, 0.0619283},
{c, -0.00654576, 0.0180935, -0.361774, 0.725869},
{d, 0.00207062, 0.00435128, 0.475865, 0.645509},
{f, -0.000110087, 0.000326651, -0.337019, 0.743829},
{g, -0.00032114, 0.000544423, -0.589872, 0.569787},
{k, 0.00368219, 0.00430652, 0.855027, 0.414717},
{l, 0.0200836, 0.0100457, 1.99923, 0.0766475},
{m, 0.0000822649, 0.0000480436, 1.71229, 0.120998}
}
```

```
In[19]:= ys["AdjustedRSquared"]
```

Продовження додатку Д

Out[19]= 0.997582

```
ys["CovarianceMatrix"]
{{45.0039,-1.30569,-1.92696,-
0.00919056,0.0147814,0.0002466,0.000441331,0.0136585,0.0298802,-0.0000764262},{-
1.30569,0.0998442,-0.038335,0.000145769,-0.000437019,-6.93*10-6,-2.63563*10-9,-
0.00128697,0.00120553,7.87308*10-7},{-1.92696,-0.038335,0.229299,-0.000365265,-
0.000622525,-3.26061*10-7,-0.0000191149,0.000757936,-0.00454277,6.37944*10-6},{-
0.00919056,0.000145769,-0.000365265,0.000327376,6.20605*10-7,-3.73949*10-6,-6.81487*10-6,
1.18695*10-6,0.0000177601,-2.96105*10-7},{0.0147814,-0.000437019,-0.000622525,6.20605*10-7,
0.0000189336,2.81801*10-10,-1.30463*10-10,3.77777*10-8,-8.72469*10-7,-4.86602*10-9},
{0.0002466,-6.93*10-6,-3.26061*10-7,-3.73949*10-6,2.81801*10-10,1.06701*10-7,1.0274*10-12,-
2.97499*10-10,6.87069*10-9,3.83199*10-11},{0.000441331,-2.63563*10-9,-0.0000191149,-
6.81487*10-6,-1.30463*10-10,1.0274*10-12,2.96397*10-7,1.37731*10-10,-3.18088*10-9,-1.77407*10-11},
{0.0136585,-0.00128697,0.000757936,1.18695*10-6,3.77777*10-8,-2.97499*10-10,1.37731*10-10,
0.0000185461,-0.0000170754,-9.67764*10-9},{0.0298802,0.00120553,-
0.00454277,0.0000177601,-8.72469*10-7,6.87069*10-9,-3.18088*10-9,-
0.0000170754,0.000100915,-1.40113*10-7},{-0.0000764262,7.87308*10-7,6.37944*10-6,-
2.96105*10-7,-4.86602*10-9,3.83199*10-11,-1.77407*10-11,-9.67764*10-9,-1.40113*10-7,
2.30819*10-9}}
```

```
ys["CorrelationMatrix"]
{{1,-0.615962,-0.599856,-0.075717,0.506377,0.112534,0.120838,0.472773,0.443384,-
0.237127},{-0.615962,1,-0.253357,0.0254965,-0.31785,-0.067141,-0.000015321,-
0.94576,0.379786,0.0518617},{-0.599856,-0.253357,1,-0.0421584,-0.298771,-0.00208456,-
0.0733219,0.36754,-0.944368,0.277297},{-0.075717,0.0254965,-0.0421584,1,0.0078827,-
0.632711,-0.691827,0.0152329,0.0977108,-0.340633},{0.506377,-0.31785,-
0.298771,0.0078827,1,0.000198263,-0.0000550725,0.00201601,-0.0199597,-
0.0232767},{0.112534,-0.067141,-0.00208456,-0.632711,0.000198263,1,5.77722*10-6,-
0.000211483,0.00209381,0.00244177},{0.120838,-0.000015321,-0.0733219,-0.691827,-
0.0000550725,5.77722*10-6,1,0.0000587447,-0.00058161,-0.000678263},{0.472773,-
0.94576,0.36754,0.0152329,0.00201601,-0.000211483,0.0000587447,1,-0.394698,-
0.0467743},{0.443384,0.379786,-0.944368,0.0977108,-0.0199597,0.00209381,-0.00058161,-
0.394698,1,-0.290312},{-0.237127,0.0518617,0.277297,-0.340633,-0.0232767,0.00244177,-
0.000678263,-0.0467743,-0.290312,1.}}
```

In[24]:= yss["BestFit"]

```
Out[24]= 23.0655 - 0.345629 x1 + 0.00368219 x1^2 - 1.0204 x2 +
0.00207062 x1 x2 + 0.0200836 x2^2 - 0.00654576 x3 -
0.000110087 x1 x3 - 0.00032114 x2 x3 + 0.0000822649 x3^2
```

Продовження додатку Д

```
In[14]:= yss["BestFitParameters"]
```

```
Out[14]= {a0 -> 17.8924, a -> -0.287055, b -> -0.661289,  
c -> -0.232063, d -> 0.00183466, f -> -0.00453952, g -> -0.0127826,  
k -> 0.00301837, l -> 0.0124242, m -> 0.119206}
```

```
In[26]:= FindFit[data1,  
a0 + a x1 + b x2 + c x3 + d x1 x2 + f x1 x3 + g x2 x3 + k x1^2 +  
l x2^2 + m x3^2, {a0, a, b, c, d, f, g, k, l, m}, {x1, x2, x3}]
```

```
Out[26]= {a0 -> 23.0655, a -> -0.345629, b -> -1.0204,  
c -> -0.00654576, d -> 0.00207062, f -> -0.000110087,  
g -> -0.00032114, k -> 0.00368219, l -> 0.0200836, m -> 0.0000822649}
```

Для аналізу рівняння регресії з метою визначення рівняння регресії представимо його у вигляді:

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

В даному рівнянні літерою z позначено віброприскорення $A\omega^2$.

Перший етап – визначити частинні похідні функції за кожною змінною.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -0,346 + 0,00736t + 0,00207v - 0,00011z$$

$$\frac{\partial Q}{\partial v} = -1,0204 + 0,00207t + 0,0402v - 0,000321z$$

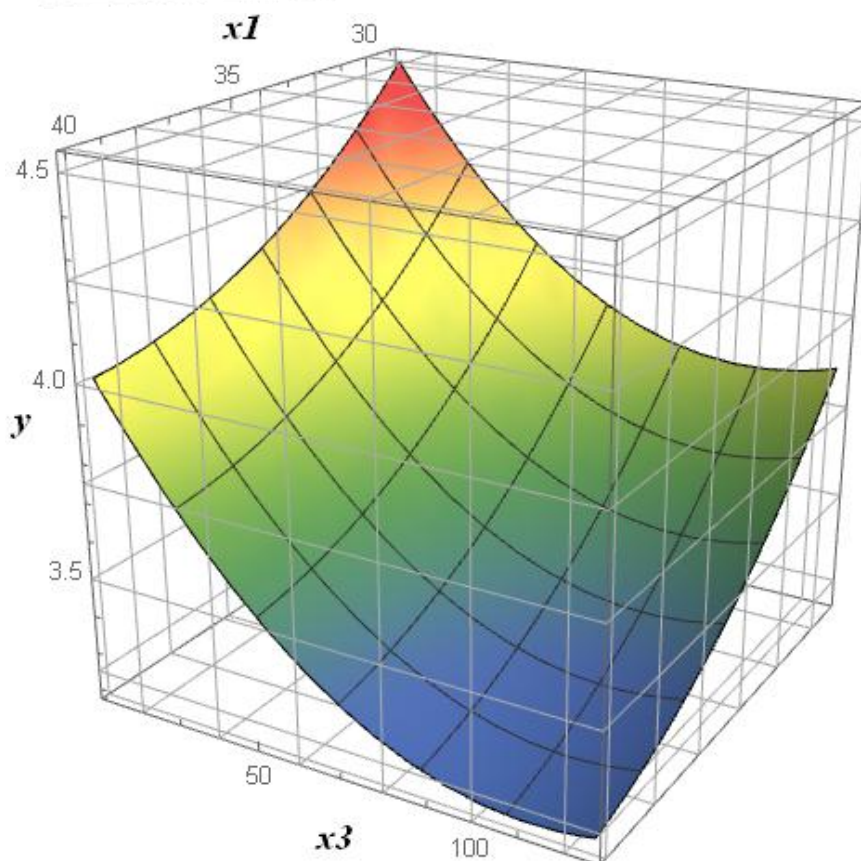
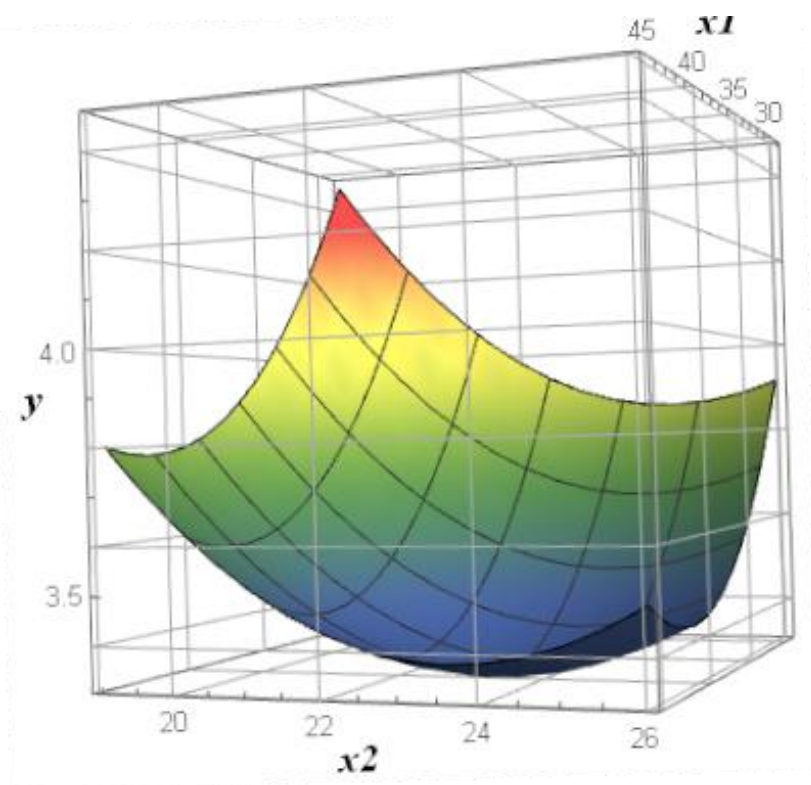
$$\frac{\partial Q}{\partial z} = -0,00655 - 0,00011t - 0,000321v + 0,000165z$$

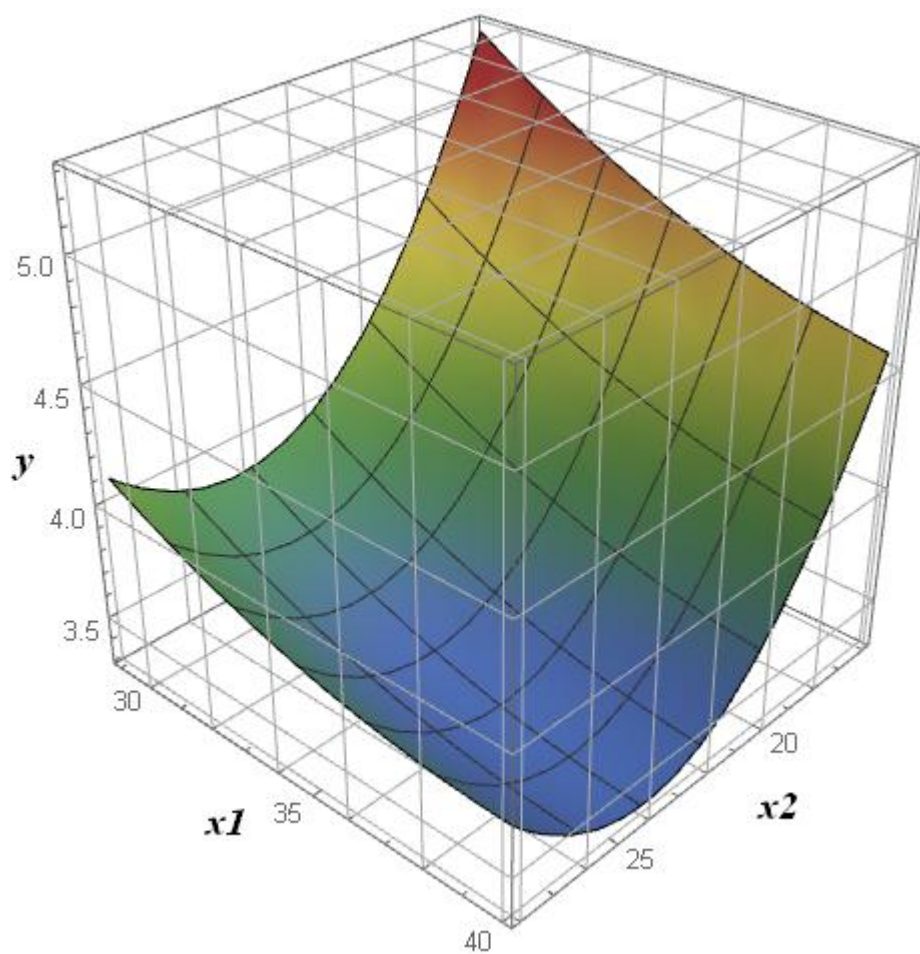
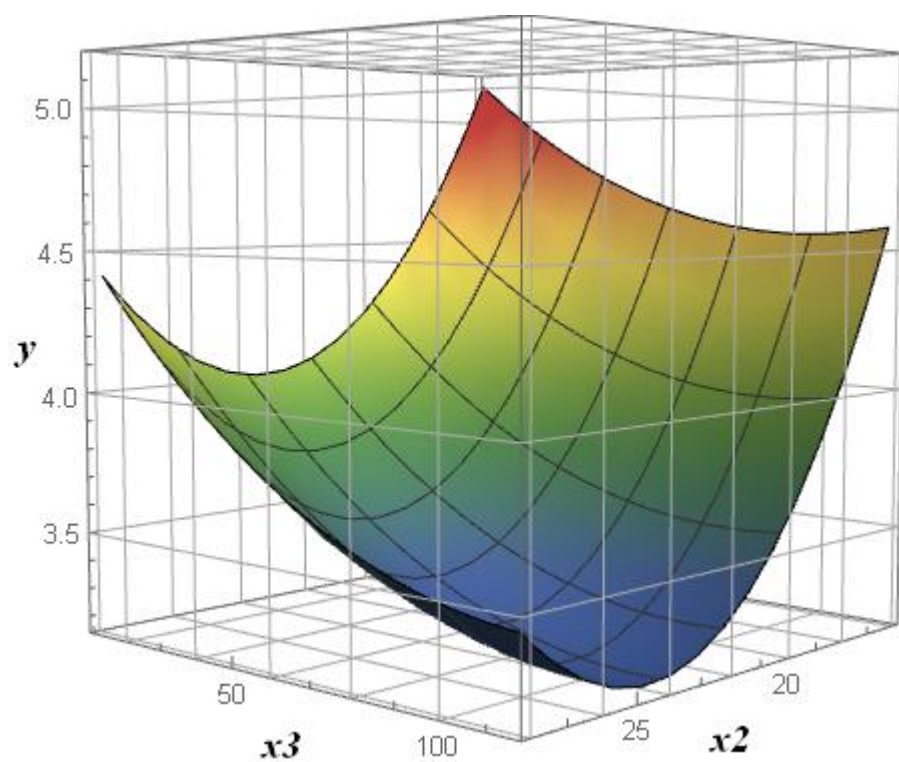
Наступним етапом – прирівняємо кожен із отриманих похідних до нуля. Отримаємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими. Корені цієї системи будуть критичними точками. В нашому випадку якщо вони забезпечують мінімум функції, то вони і будуть раціональними параметрами процесу сушіння волоських горіхів на вібраційній машині.

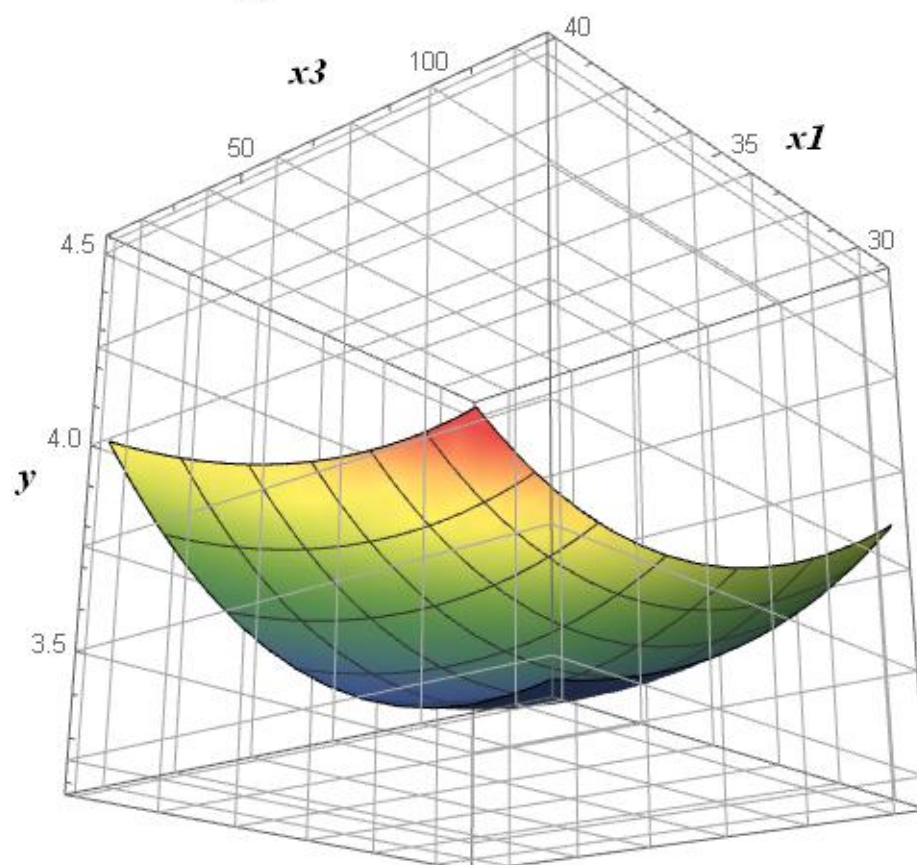
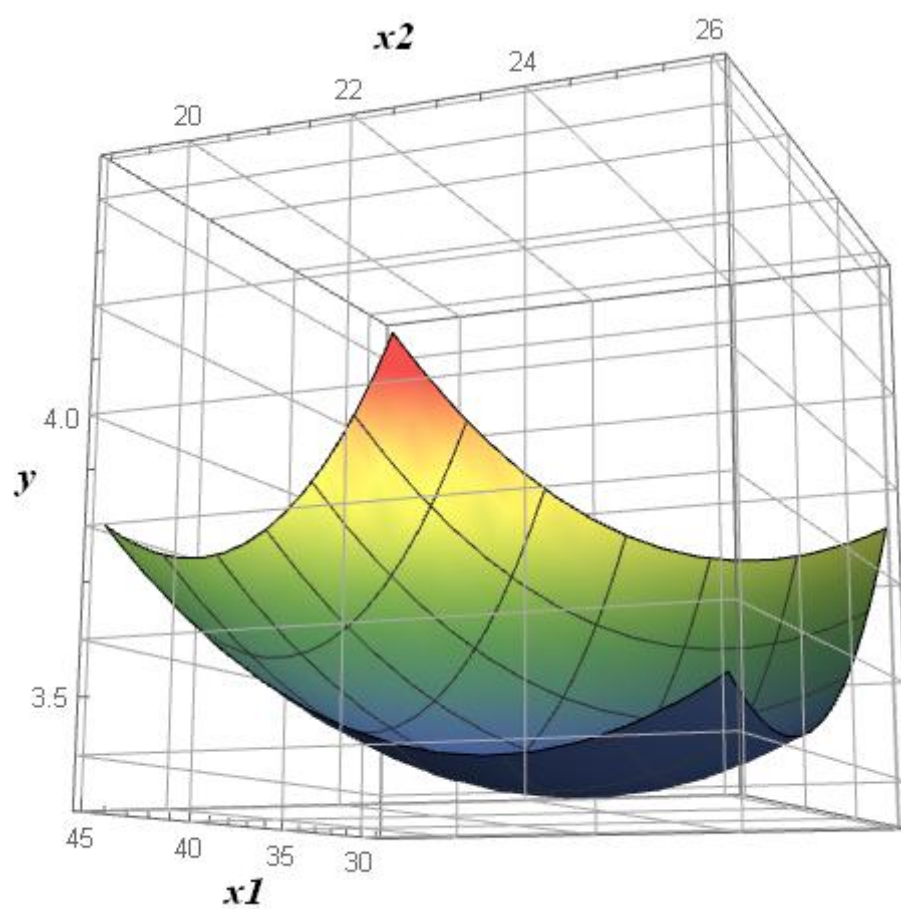
Система згаданих рівнянь буде мати вигляд:

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

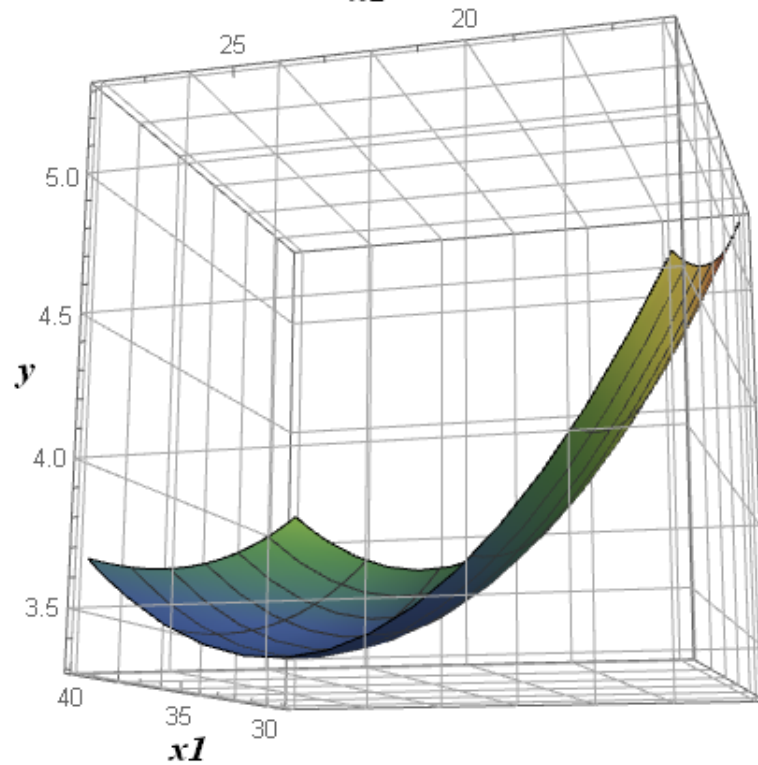
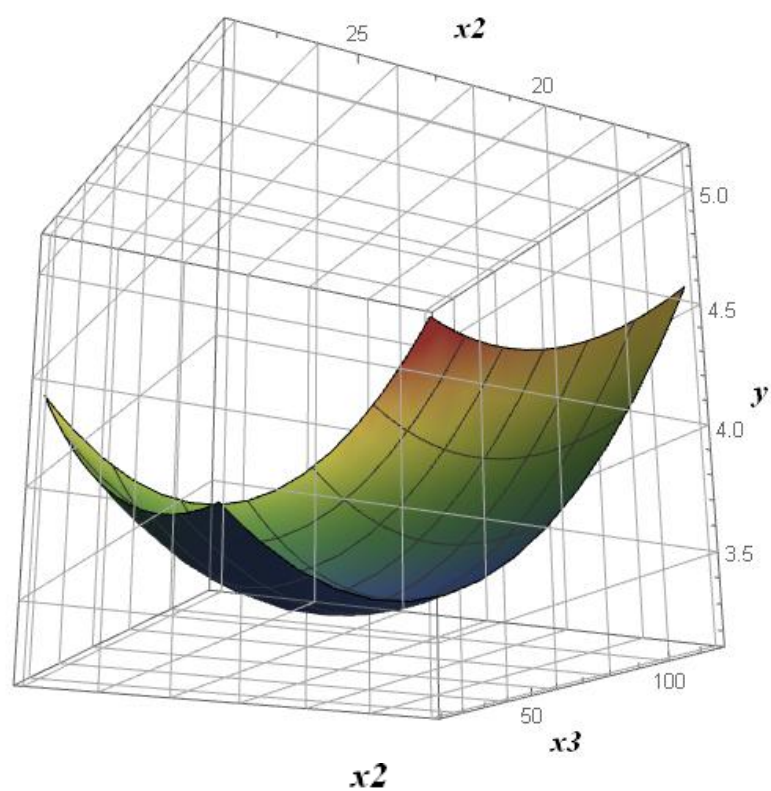
Коренями даної системи будуть наступні значення: $t = 38^{\circ}\text{C}$; $v=22.5 \text{ м/с}$;
 $z(A\omega^2)=65,6 \text{ м/с}^2$. Ці корені забезпечують мінімальне значення функції Q
, тобто затратам енергії на випаровування кілограму вологи. Ці значення і є
раціональними режимними параметрами.







Продовження додатку Д



Статистична оцінка відповідності теоретичних і експериментальних даних

У документі наведено формули, вихідні дані, результати розрахунків і графіки. Час позначено як τ (год).

Вихідні дані

τ (год)	$Y_{\text{теор.}} (v^{\circ}\text{C})$	$Y_{\text{експ}} (v^{\circ}\text{C})$	$\Delta = Y_{\text{експ}} - Y_{\text{теор}}$
0.28	17.0	19.0	2.0
0.56	18.5	19.5	1.0
0.83	21.0	20.0	-1.0
1.11	21.8	21.0	-0.8
1.67	24.1	22.0	-2.1
2.78	26.0	25.0	-1.0
3.06	26.8	26.0	-0.8
3.33	27.2	27.0	-0.2
3.89	28.0	29.0	1.0
4.17	28.2	30.0	1.8

Обчислення середніх

$$\bar{Y}_{\text{теор}} = \frac{1}{n} \sum Y_{\text{теор}} = 23.86$$

$$\bar{Y}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum Y_{\text{експ}} = 23.85$$

Коефіцієнт кореляції Пірсона (r)

$$r = \frac{\sum (Y_{\text{теор}} - \bar{Y}_{\text{теор}})(Y_{\text{експ}} - \bar{Y}_{\text{експ}})}{\sqrt{\sum (Y_{\text{теор}} - \bar{Y}_{\text{теор}})^2 \cdot \sum (Y_{\text{експ}} - \bar{Y}_{\text{експ}})^2}}$$

$$r=0.943$$

Середньоквадратична похибка (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_{\text{експ}} - Y_{\text{теор}})^2}{n}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(2)^2 + (1)^2 + (-1)^2 + (-0.8)^2 + (-2.1)^2 + (-1)^2 + (-0.8)^2 + (-0.2)^2 + (1)^2 + (1.8)^2}{10}} = 1.30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Середня абсолютна похибка (MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |Y_{\text{експ}} - Y_{\text{теор}}|$$

$$MAE = \frac{2 + 1 + 1 + 0.8 + 2.1 + 1 + 0.8 + 0.2 + 1 + 1.8}{10} = 1.17^\circ\text{C}$$

Середня відносна похибка (MAPE)

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{Y_{\text{експ}} - Y_{\text{теор}}}{Y_{\text{експ}}} \right|$$

$$MAPE = 5.13 \%$$

Середнє теоретичне значення: 23.86 °C

Середнє експериментальне значення: 23.85 °C

Коефіцієнт кореляції Пірсона: $r = 0.943$

Середньоквадратична похибка (RMSE): 1.30 °C

Середня абсолютна похибка (MAE): 1.17 °C

Середня відносна похибка (MAPE): 5.13 %

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного
аграрного університетуВіктор МАЗУР
«_____» _____ 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ПП «ЯФК-ВІТОН»

Микола ШАРКО
«_____» _____ 2024 р.АКТ
про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Вінницького національного аграрного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дідик Андрій Михайлович під керівництвом д.т.н., професора кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ Цуркана Олега Васильовича, з однієї сторони, і представник ПП «ЯФК-ВІТОН» (ЄДРПОУ 40481318, Вінницька обл., Могилів-Подільський р-н., село Велика Кісниця, вул. Ринкова, буд. 4) директор Шарко Микола Семенович, з другої сторони, склали цей акт про те, що розроблена Дідиком А.М. вібраційна машина для сушіння волоських горіхів проходила виробничу перевірку на базі ПП «ЯФК-ВІТОН».

Дослідження проводили відповідно до проектної документації та технічних умов, затверджених у ході науково-дослідних робіт. Конструктивні параметри вібраційної машини наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Конструктивні параметри вібраційної машини

Конструктивні параметри		Одиниці вимірювання	Значення
Назва	Позначення		
Об'єм сушильної камери	V_k	м ³	4,2
Кількість пружних елементів підвіски		шт.	4
Кількість дебалансів	n	шт.	6
Кут розвороту дебалансів	α	град.	0-180
Частота обертання електродвигуна приводу вала вібробуджувача	n_d	хв ⁻¹	985
Частота коливань сушильної камери	f	Гц	10-24
Амплітуда коливань сушильної камери	A	мм	3-10
Ступінь завантаження сушильної камери	φ_{max}	%	75
Габаритні розміри:			
-висота		мм	1020;
-довжина			3100;
-ширина			1910.

В ході перевірки здійснено аналіз основних параметрів роботи вібраційної машини, що включає визначення параметрів теплоносія, амплітудно-частотних характеристик, споживаної енергії та ефективності процесу сушіння. У ході випробувань встановлено, що при амплітуді коливань

Продовження додатку Є

$A = 6,5$ мм та частоті коливань сушильної камери $f = 16$ Гц, швидкості теплоносія $V = 22,5$ м/с, при температурі $t = 38$ °С та витраті $Q = 0,4$ м³/с відбувається мінімізація енергетичних витрат, що підтверджується розрахунками потужності привода віброзбуджувача, електронагрівача повітря та вентилятора подачі теплоносія. Також було підтверджено, що при даних режимних параметрах обладнання відбувається зниження вологості з $W_n = 28\%$ до $W_k = 10\%$ при отриманні продукту належної якості.

При цьому забезпечувалась продуктивність по матеріалу $\Pi = 126,7$ кг/год, витрата енергії на випаровування одного кілограма вологи становила 3,91 МДж/кг.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що ефективна робота вібраційної машини досягається за умов збалансованого поєднання вказаних режимних параметрів теплоносія, амплітудно-частотних характеристик сушильної камери, споживаної енергії та ефективності процесу сушіння.

Високі показники ефективності, низькі енергетичні витрати та нормативна якість сушіння роблять нову вібраційну машину енергоефективною та доцільною для використання у технологічній лінії переробки волоських горіхів.

Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що розроблена конструкція вібраційної машини є конкурентоспроможною в порівнянні з існуючими конвективними сушарками.

Від ВНАУ

д.т.н., професор кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ



Олег ЦУРКАН

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»



Андрій ДІДИК



Від ПП «ЯФК-ВІТОН»

директор

Микола ШАРКО

« » 2024 р.

« » 2024 р.

Продовження додатку Є

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного
аграрного університетуВіктор МАЗУР
« » 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Агромаш-Калина»

Юрій БЕЗУГЛИЙ
« » 2024 р.

А К Т

про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які отримані здобувачем третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дідиком Андрієм Михайловичем під керівництвом доктора технічних наук, професора, професора кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, інженерно-технологічного факультету, Вінницького національного аграрного університету, Цуркана Олега Васильовича впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Вінницька область, Хмельницький район, місто Калинівка, вул. Незалежності, 46). ТОВ «Агромаш-Калина» в особі директора Безуглого Юрія Миколайовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію вібраційної машини, яка розроблена в межах виконання дисертаційної роботи «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини для сушіння волоських горіхів» Дідиком А.М. і Цурканом О.В.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» зацікавлене у виготовленні дослідних зразків вібраційних машин у кількості 6 екземплярів для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУ

д.т.н., професор кафедри інженерної
механіки та технологічних процесів в
АПК інженерно-технологічного
факультету ВНАУ

Олег ЦУРКАН

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»

Андрій ДІДИК

« » 2024 р.

Від ТОВ «Агромаш-Калина»

директор

Юрій БЕЗУГЛИЙ

« » 2024 р.



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03,
email: office@vsn.org, rector@vsn.org, код ЄДРПОУ 00497236

05 грудня 2024 р. № 01.1-60-1519
на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукових досліджень
дисертаційної роботи **Дідика Андрія Михайловича**
на тему: «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів вібраційної
машини для сушіння волоських горіхів»

Повідомляємо, що наукові розробки Дідика Андрія Михайловича за
вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовлено їх
впровадженням у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри
інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-
технологічного факультету.

Положення дисертаційної роботи використовується при викладанні
навчальної дисципліни «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв».

Довідка видана Дідику А.М. для представлення у спеціалізовану вчену
раду за місцем захисту його дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії
Вінницького національного аграрного університету від 06 листопада 2024 року,
протокол № 4.

Ректор



Віктор МАЗУР

№ 02172