

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-43>

УДК (631.365:[641.3:613.26]):681.5(045)

ОМЕЛЬЧЕНКО ОЛЕКСАНДР

ННІЕТ імені Михайла Туган-Барановського КНУ

<https://orcid.org/0000-0003-0704-5909>

e-mail: omelchenko@donnuet.edu.ua

ЦВІРКУН ЛЮДМИЛА

ННІЕТ імені Михайла Туган-Барановського КНУ

<https://orcid.org/0000-0002-1879-0608>

e-mail: cvirkun@donnuet.edu.ua

ГОНЧАРЕНКО ВОЛОДИМИР

ННІЕТ імені Михайла Туган-Барановського КНУ

e-mail: honcharenko@donnuet.edu.ua

ПЕРЕКРЕСТ ВОЛОДИМИР

ННІЕТ імені Михайла Туган-Барановського КНУ

<https://orcid.org/0000-0003-1753-0721>

e-mail: perekrest@donnuet.edu.ua

УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

В роботі запропоновано здійснювати прогнозування потенційно очікуваних змін тиску, температури та вологості під час первинного та вторинного етапів сублімаційного сушіння, які мають різні механізми сушіння та вимагають ретельного моніторингу та контролю для забезпечення якості отриманої сушеної сировини за допомогою контрольовано-вимірних засобів, що сприятиме уникненню пошкодженої сировини. Застосування спеціалізованих датчиків сприятиме покращенню процесу сушіння за допомогою контролю основних параметрів роботи сублімаційної сушарки. Досліджено процес сушіння бананів різними методами: конвективним та мікрохвильовим методами, а також комбінованими методами сушіння, а саме сублімаційно-конвективним та сублімаційно-мікрохвильовим методами сушіння. Інтерпретовано результати дослідження.

Ключові слова: сублімаційна сушарка, засоби автоматизації, плодово-овочева сировина, комбіновані методи сушіння, якість продукції.

OMELCHENKO OLEKSANDR, TSVIRKUN LYUDMILA,
HONCHARENKO VOLODYMYR, PEREKREST VOLODYMYR

Mykhailo Tuhan-Baranovskyi ESIET KNU

IMPROVEMENT OF EQUIPMENT FOR DRYING FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS BASED ON AUTOMATION MEANS

It is noted that fruit and vegetable raw materials contain a number of nutritional components that are beneficial to human health: vitamins, minerals, carbohydrates, which support health, increase immunity and prevent diseases. However, vegetables and fruits cannot be stored for a long time in natural conditions, which requires extending the shelf life of raw materials using various preservation methods, including drying and freezing. Attention is focused on the fact that drying processes should reduce drying time and minimize energy costs while maintaining high product quality. Therefore, the use of automated control technologies will make it possible to improve the operation of equipment for drying plant raw materials, namely, maintaining the desired quality and reducing defective products. It is proposed to predict potentially expected changes in pressure, temperature and humidity during the primary and secondary stages of freeze-drying, which have different drying mechanisms and require careful monitoring and control to ensure the quality of the obtained dried raw materials using control and measuring equipment, which will help avoid damaged raw materials, destruction of the internal structure, as well as deterioration of many product characteristics, such as texture, volume, shape and color. It is considered advisable to reduce changes in the quality of fruit and vegetable raw materials to use combined drying methods, namely, combining freeze-drying with microwave, infrared or convective drying methods. The process of drying bananas by various methods was studied: convective and microwave methods, as well as combined drying methods, namely, sublimation-convective and sublimation-microwave drying methods. The effect of these drying methods on the physical parameters of the raw material (color, shape, texture) was compared. The results show that in the process of drying bananas it is advisable to use the convective drying method, sublimation-convective and sublimation-microwave drying methods, because the obtained raw material samples have the desired color, shape and texture. However, during microwave drying, banana samples were obtained that do not meet the specified quality indicators, because they have a slightly brownish color, a structure that is somewhat fragile, not elastic enough and slightly deforms when bent. The results of the study were interpreted.

Keywords: freeze dryer, automation tools, fruit and vegetable raw materials, combined drying methods, product quality.

Стаття надійшла до редакції / Received 12.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Омельченко Олександр, Цвіркун Людмила, Гончаренко Володимир, Перекрест Володимир

Постановка проблеми

Плодово-овочева сировина містить низку поживних компонентів, які є корисними для здоров'я людини: вітаміни, мінерали, вуглеводи, які підтримують здоров'я, підвищують імунітет і запобігають захворюванням. Проте овочі та фрукти не можуть довго зберігатися в природніх умовах, що потребує продовження терміну придатності сировини за допомогою різних методів збереження, включаючи сушіння та заморожування. Застосовуючи відповідні методи сушіння, можна підвищити якість продукції та зменшити втрати [15]. В. Шутюк зазначає, що нині проблематика перероблення сільськогосподарських сировини і

продуктів з метою зменшення їхніх втрат, збільшення термінів зберігання, підвищення якості харчових продуктів та їх конкурентоздатності є пріоритетною для України [1]. Процеси сушіння мають скорочувати час висихання та мінімізувати енергетичні витрати зберігаючи при цьому високу якість продукції.

Задля цього необхідно, по-перше, обрати ефективну систему сушіння для зменшення енергоспоживання сушарки під час процесу дегідратації, а також для мінімізації погіршення якості висушених продуктів. Процес сушіння повинен проводитися таким чином, щоб мінімізувати зміни якості показників плодово-овочевої сировини, а саме фізичних (розмір, об'єм, текстура), а також хімічних як реакції потемніння та зміна кольору. Колір продукту є одним з основних критеріїв якості, який враховують споживачі. Ненавмисне теплове руйнування кількох корисних хімічних сполук може вплинути на змінами кольору сушеної сировини та відповідно на її якість [2]. По-друге, застосування автоматизованих технологій управління для промислових сушарок забезпечить можливості для покращення роботи сушарки та її ефективності, а саме підтримка бажаної якості сушених продуктів, незалежно від порушень у процесі сушіння та коливань у постачанні сировини та зменшення продукції, яка має дефекти. А головне уникнення пересушування та недостатнього сушіння, бо недостатнє сушіння може призвести до псування деяких видів продуктів харчування, тоді як пересушування сировини призводить до збільшення витрат на енергію та зменшення якості сировини [3].

Аналіз досліджень та публікацій

Сушильне обладнання можна поділити за різними критеріями, наприклад, враховуючи механізм сушіння: конвективні сушарки (використовують принцип гарячого повітряного у процесі сушіння, коли повітря нагрівається шляхом спалювання викопного палива, а волога у сировині зменшується за допомогою потоку сушильного газу) [2]; контактні сушарки (використовують принцип прямого контакту вологого продукту з гарячою поверхнею в результаті чого відбувається швидке випаровування вологи, передаючи теплову енергію безпосередньо до продукту, який контактує з гарячою поверхнею циліндричних камер) [4]; сублімаційні сушарки (здійснюють заморожування всієї доступної вологи, зменшують деградацію за рахунок впливу низької температури, а видалення води із замороженого продукту, здійснюється під вакуумом, що дозволяє льоду переходити безпосередньо з твердого стану в пару минаючи рідку фазу) [5].

Сублімаційне сушіння є важливим процесом, що використовується в різних галузях, зокрема в харчовій промисловості для дегідратації та збереження чутливих матеріалів. На відміну від звичайних методів сушіння, сублімаційне сушіння працює за умов зниженого тиску, що дозволяє видалити вологу без підвищення температури, яке могло б погіршити якість плодово-овочевої сировини. Сублімаційне сушіння призначене для видалення води із замороженої сировини шляхом сублімації кристалів льоду під високим вакуумним тиском і низькою температурою [6]. Типова сублімаційна машина складається з таких основних частин: камери сушіння, вакуумного насоса, джерела тепла та конденсатора. Система охолодження є основною частиною сублімаційної сушарки, яка використовується для забезпечення охолодження та заморожування. Це критично важливий компонент, який забезпечує швидке заморожування продукту та підтримку його при низькій температурі протягом усього процесу. Холодильна система зазвичай складається з компресора, конденсатора, випарника та розширювального клапана. Вакуумний насос уможливує досягнення бажаного рівня вакууму, який є нижчим за 0,61 кПа, неконденсовані гази повинні бути видалені з камери за допомогою вакуумного насоса. Сушильна камера – це місце, де розміщена сировина і оскільки в камері відбуваються процеси нагрівання та охолодження, камера має бути вакуумно-щільною. Система нагріву використовується для забезпечення необхідного тепла під час процесу сушіння для сприяння сублімації вологи всередині сировини [7, 8]. Сублімаційне сушіння є методом зневоднення, який має низку переваг, зокрема збільшення терміну зберігання, отримання відповідної текстури та якості сушеної сировини. Однак традиційні системи сублімаційного сушіння мають тривалий процес сушіння, що призводить до високого споживання енергії. Тому останнім часом науковці приділяють увагу комбінованим методам сублімаційного сушіння. Розглянемо деякі комбіновані методи, які застосовуються в харчовій промисловості, таблиця 1.

Таблиця 1

Комбіновані методи сублімаційного сушіння	
Методи сушіння	Характеристика
Поєднання мікрохвильового та сублімаційного сушіння	<p>Мікрохвильове сушіння створює додаткові рушійні сили для збільшення потоку відведеної від поверхні частинок матеріалу вологи. Нагрівання при цьому виступає основним «драйвером» процесу масоперенесення вологи у внутрішніх шарах частинок, а комбінований з ним додатковий процес дозволяє збільшити потік вологи [9].</p> <p>Використання мікрохвильових випромінювачів в процесах дегідратації суттєво інтенсифікує вилучення вологи з харчової сировини за рахунок взаємодії електромагнітного поля безпосередньо з полярними молекулами проникаючи вглиб продукту до 25 мм [10].</p> <p>Поєднання мікрохвильового та сублімаційного сушіння допомагає підвищити швидкість сушіння та зменшити споживання енергії, зберігаючи при цьому поживні речовини та створюючи привабливі кольори [6].</p> <p>Використання високочастотних хвиль у поєднанні з вакуумним сушінням забезпечує високий рівень інтенсифікації процесу та дає можливість сушити матеріали швидше й ефективніше [11].</p>

Методи сушіння	Характеристика
Поєднання інфрачервоного та сублімаційного сушіння	Інфрачервоне сушіння має високу ефективність перетворення електричної енергії в тепло, проникнення випромінювання безпосередньо у виріб, рівномірне нагрівання продукту, а також вирівнювання профілю вологості в продукті та низький рівень псування продукту [10]. Поєднання ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням є альтернативною технологією сушіння через мінімальні втрати енергії під час процесу. Вони характеризуються виробництвом продуктів високої якості та високим тепловим ефектом [2].
	Інфрачервоне сублімаційне сушіння – це інноваційний процес сушіння, який використовує інфрачервоні, а не електричні нагрівальні пластини для отримання енергії для сублімації льоду, що збільшує швидкість теплопередачі. Поєднання ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням – це двоетапний процес сушіння з інфрачервоною попередньою дегідратацією з подальшим сублімаційним сушінням [6].
Поєднання конвективного та сублімаційного сушіння	Конвективні способи сушіння пов'язані з переміщенням значних об'ємів теплоносія. Викиди теплового відпрацьованого теплоносія визначають низьку ефективність використання енергетичних ресурсів [10]. Поєднання сублімаційного сушіння з конвективним сушінням гарячим повітрям значно скорочує тривалість сушіння та споживання енергії порівняно з чистим сублімаційним сушінням [6]. Комбіноване застосування двох технологій значно скорочує час сушіння та споживання енергії через вищу середню швидкість переносу маси. Поєднання сублімаційного сушіння з конвективним сушінням гарячим повітрям є енергоефективним та споживає менше енергії, що робить його перспективною технологією для сушіння фруктової сировини [12].

Метою будь-якого процесу сушіння є отримання сировини бажаної якості з мінімальними витратами, максимальною продуктивністю та підтримання цих показників на постійному рівні для досягнення бажаних якісних характеристик (вологість, розмір, колір, текстура) сухого продукту. Проте сушіння є енергоємною операцією, яка становить до 15% від загального промислового енергоспоживання [3]. Потреба в оптимальному управлінні енергією та продуктах високої якості потребує застосування засобів автоматизації у процесі керування основними параметрами сушарки такими, як температура та тиск, бо занадто висока або занадто низька температура та тиск можуть призвести до проблем у виробничому процесі або навіть до пошкодження обладнання, що впливає на якість продукції та ефективність виробництва [13]. Тому через важливість збереження якості кінцевого продукту, покращення ефективності процесу переробки сировини та зменшення відходів під час процесу сушіння автоматичний контроль є важливим, а застосування спеціалізованих датчиків сприятиме покращенню процесу сушіння за допомогою контролю основних параметрів роботи сублімаційної сушарки.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: удосконалення обладнання для сушіння плодово-овочевої сировини на основі засобів автоматизації.

Виклад основного матеріалу

Застосування автоматизованих технологій управління для промислових сушарок забезпечує можливість для покращення роботи сушарки та її ефективності, а саме підтримка бажаної якості сушених продуктів та зменшення продукції, яка має дефекти. А головне уникнення пересушування та недостатнього сушіння, бо недостатнє сушіння може призвести до псування деяких видів продуктів харчування, тоді як пересушування сировини призводить до збільшення витрат на енергію та зменшення якості сировини [3]. Тому використання спеціалізованих датчиків від простих до інтелектуальних для регулювання основних параметрів у сушарці є необхідним для покращення виробничого процесу. Датчики зазвичай нагадують людські відчуття такі як зір, слух, дотик, смак проте вони значно перевершують людську чутливість у плані числової та повторювальної оцінки змінних навколишнього середовища, таких як температура, вологість, швидкість повітря. Критичними характеристиками сенсора є чутливість (він чутливий до вимірюваної властивості), селективність (нечутливий до будь-якої іншої властивості) та не впливає на вимірювану властивість [14].

Контроль тиску є важливими параметрами у процесі сублімаційного сушіння. Тиск у камері сублімаційного сушіння необхідно контролювати та регулювати для полегшення сублімації замороженої води. Тиск має істотний вплив як на перебіг процесу так і на якість кінцевих продуктів, зокрема на характеристики кольору. Даний параметр можна розглядати, як один з найважливіших параметрів у процесі сублімації, який потрібно ретельно контролювати, бо при більшому робочому тиску можна отримати темніші та більш насичені кольори сушеної сировини [5]. Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик тиску P всередині сушильної камери, щоб уникнути пошкодження сировини, яка підлягає сушінню та отримати зразки відповідної якості. Схема сублімаційної сушильної машини із застосуванням засобів автоматизації представлена на рисунку 1.

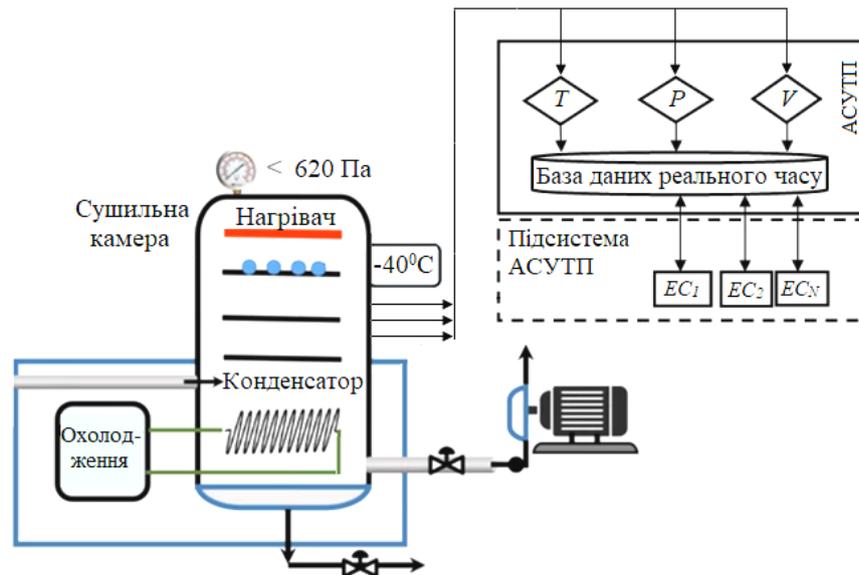


Рис. 1 Схема сублимаційної сушильної машини із застосуванням засобів автоматизації

АСУТП – автоматизована система управління процесом сушіння; датчики (тиску, температури та вологості), які є контрольно-вимірювальними засобами; ЕС – експертний сигнал. Блок-схема містить елементи керування для прогнозування потенційно очікуваних змін тиску, температури та вологості під час первинного та вторинного етапів сублимаційного сушіння, які мають різні механізми сушіння та вимагають ретельного моніторингу та контролю для забезпечення якості отриманої сировини.

Первинні та вторинні етапи сублимаційного сушіння мають різні механізми сушіння та вимагають ретельного моніторингу та контролю для забезпечення якості та ефективності продукції. Найдовший етап сушіння – це сублимація льоду, яка вимагає більше енергії, ніж наступний етап сушіння. Однак температура, що занадто висока, може призвести до усадки або танення льоду під час етапу сублимації сушіння. Початок фази вторинного сушіння або завершення первинного сушіння важко визначити. Перед завершенням первинного процесу сушіння, коли температура підвищується, продукт може колапсувати, а кінцева якість може постраждати [5]. Будь-яке відхилення від оптимальних умов може призвести до тривалого висихання, структурних пошкоджень або погіршення якості продукту.

Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик вологості V та температури T всередині сушильної камери, що дозволить визначити кінцеву точку первинного сушіння. Така точність первинної фази сушіння не лише скоротить час циклу та забезпечить стабільну якість продукції, а й безпосередньо впливатиме на тривалість вторинної сушки, бо якщо залишкова вологість першої фази буде високою – це вплине на другу фазу сушіння, яка триватиме довше ніж потрібно для отримання якісної сировини. Вторинний етап сублимаційного сушіння передбачає видалення залишків вологи з продукту. Вищі температури сублимаційного сушіння на вторинному етапі повинні прискорити процес сушіння, оскільки для видалення надлишкової води із сировини потрібно більше енергії [3, 5, 14]. Тому контроль рівня вологи дуже важливий на цьому етапі, бо необхідно запобігти пересушуванню сировини, що може призвести до зменшення якості продукту. Використання невідповідної температури під час процесу сушіння може призвести до небажаних змін у структурі сировини. Вважається за доцільне контролювати рівень вологи на другому етапі сублимаційного сушіння за допомогою датчиків вологи V та температури T , що уможливить уникнення пошкодженої сировини, руйнування внутрішньої структури, а також погіршення багатьох характеристик продукту, таких як текстура, об'єм, форма, колір.

Процес сушіння повинен проводитися таким чином, щоб мінімізувати зміни якості показників плодово-овочевої сировини, а саме фізичних (розмір, об'єм, текстура), а також хімічних як реакції потемніння та зміна кольору. Було досліджено процес сушіння бананів різними методами: конвективним та мікрохвильовим методами, а також комбінованими методами сушіння, а саме сублимаційно-конвективним та сублимаційно-мікрохвильовим методами сушіння. Порівняно вплив цих методів сушіння на фізичні параметри сировини (колір, форма, текстура), щоб визначити, який метод сушіння є найбільш перспективним для сушіння бананів.

1. Конвективний метод сушіння та сублимаційно-конвективний метод сушіння. Конвективний метод сушіння передбачав сушіння бананів при температурі 60°C . Отримані сушені банани мають відповідний зовнішній вигляд (однорідний золотавий колір), форму (однорідна), текстуру (не крихка, не достатньо еластична при згинанні частково деформується) [15]. Процес сублимаційного сушіння проводився при тиску 63 Па і безпечному тиску 103 Па при температурі нагрівання полиць при температурі 10°C протягом приблизно 2 год в сублимаційній сушарці, а потім зразки сушили в конвекційній сушарці при температурі 40°C до виділення залишків вологи. Отримані сушені банани мають відповідний зовнішній вигляд (однорідний насичено жовтий), форму (однорідна), текстуру (не крихка, еластична при згинанні не деформується). Здійснено порівняння двох методів сушіння на рисунку 2.

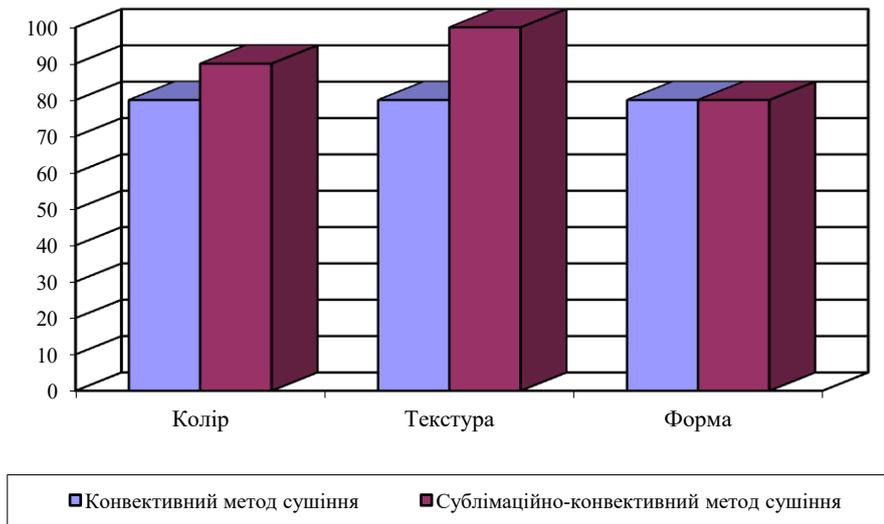


Рис. 2 Порівняння критеріїв якості сировини (конвективний метод сушіння та сублімаційно-конвективний метод сушіння)

Результати свідчать, що у процесі сушіння бананів доцільно застосовувати, як конвективний метод сушіння так і сублімаційно-конвективний метод сушіння. Отримані зразки сировини мають бажаний колір, форму та текстуру. Проте у процесі сублімаційно-конвективного методу сушіння спостерігається скорочення тривалість сушіння та отримання сировини однорідного насиченого жовтого кольору з однорідною структурою, яка є не крихка, еластична та при згинанні не деформується.

2. Мікрохвильовий метод сушіння та сублімаційно-мікрохвильовий спосіб сушіння. Мікрохвильовий метод передбачав сушіння бананів при температурі 40°C. Отримані сушені банани мають насичено коричнюватий колір, форму (дещо не однорідна), текстуру (дещо крихка, не достатньо еластична при згинанні частково деформується). Процес сублімаційного сушіння проводився при тиску 63 Па і безпечному тиску 103 Па при температурі нагрівання полиць при 10°C протягом приблизно 2 год в сублімаційній сушарці, а потім зразки сушили в мікрохвильовій пічі до виділення залишків вологи. Отримані сушені банани мають відповідний зовнішній вигляд (насичений золотаво-коричнюватий колір), форму (однорідна), текстуру (не крихка, еластична при згинанні не деформується). Здійснено порівняння двох методів сушіння на рисунку 3.

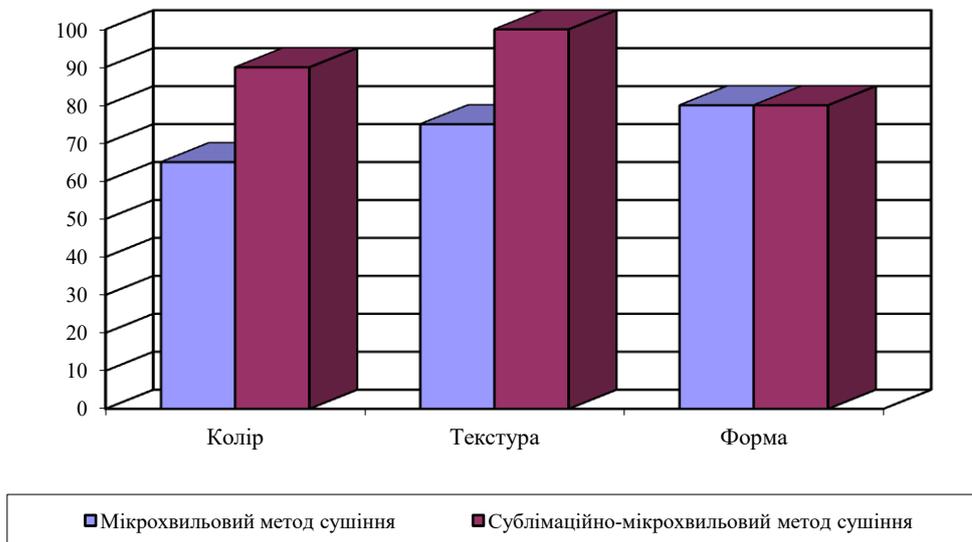


Рис. 3 Порівняння критеріїв якості сировини (мікрохвильовим метод сушіння та сублімаційно-мікрохвильовим сушіння)

Результати свідчать, що у процесі сушіння бананів доцільніше застосовувати сублімаційно-мікрохвильового методу сушіння, бо отримані зразки бананів мають бажаний колір, форму та текстуру. У процесі сублімаційно-конвективного методу сушіння спостерігається скорочення тривалість сушіння та отримання сировини однорідного насиченого золотаво-коричнюватого кольору з однорідною структурою, яка є не крихкою, еластичною та при згинанні не деформується. Під час мікрохвильового сушіння отримано зразки бананів, які мають коричнюватий колір, дещо не однорідну структуру, яка є дещо крихкою, не досить еластичною та при згинанні трохи деформується.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На основі вище зазначеного можна вважати, що автоматичне керування технологічним процесом забезпечить досягнення постійної якості сушеної сировини, а застосування спеціалізованих датчиків сприятиме покращенню процесу сушіння за допомогою контролю основних параметрів роботи сублимаційної сушарки. Запропоновано здійснювати прогнозування потенційно очікуваних змін тиску, температури та вологості під час первинного та вторинного етапів сублимаційного сушіння, які мають різні механізми сушіння та вимагають ретельного моніторингу та контролю для забезпечення якості отриманої сушеної сировини за допомогою контрольованих засобів. Досліджено процес сушіння бананів різними методами: конвективним та мікрохвильовим методами, а також комбінованими методами сушіння, а саме сублимаційно-конвективним та сублимаційно-мікрохвильовим методами сушіння. Порівняно вплив цих методів сушіння на фізичні параметри сировини (колір, форма, текстура), щоб визначити, який метод сушіння є найбільш перспективним для сушіння бананів. Інтерпретовано результати дослідження.

Перспективним вважається подальше дослідження в сфері застосування засобів автоматизації у процесі сушіння плодово-овочевої сировини, оскільки на процес сушіння мають вплив багато залежних змінних параметрів: час, вологість, температура та тиск. Належний контроль змінних процесу сушіння є важливим для отримання сировини належної якості.

Література

1. Шутюк В. В. Науково-методологічні засади ресурсозбережних енерготехнологічних комплексів сушіння харчових продуктів: дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Шутюк Віталій Володимирович. – Київ, 2016. – 350 с.
2. Nwakuba N. R. Energy consumption of agricultural dryers: an overview / N. R. Nwakuba, S. N. Asoegwu, K. N. Nwaigwe // *AgricEngInt: CIGR Journal*. – 2016. – Vol. 18(4). – P. 119–132.
3. Rami Y. Jumah. Control of industrial dryers / Rami Y. Jumah, Arun S. Mujumdar, Vijaya G. S. Raghavan // *Handbook of Industrial Drying*. – 2006. – P. 597–610. – DOI: 10.1201/9781420017618.ch49.
4. Efficient contact drying MADE BY LÖDIGE. [Electronic resource]. – URL: <https://www.loedige.de/en/process/contact-drying/> (дата звернення: 24.10.2025).
5. Jude J. Application of Freeze-Drying in Food Processing and Storage – A Review / J. Jude, E. A. Adu, I. E. Maiyanga, O. S. Kamaldeen // *Badeggi Journal of Agricultural Research and Environment*. – 2023. – Vol. 05(02). – P. 21–35.
6. Chibuzo Stanley Nwankwo. Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration: A Review on Chemical and Sensory Qualities / Chibuzo Stanley Nwankwo, Endurance Oghogho Okpomo, Nesa Dibagar, Marta Wodecki, Wiktor Zwierz, Adam Figiel // *Foods*. – Vol. 12(18). – 2023. P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12183437>.
7. Які основні компоненти вакуумної сублимаційної сушарки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.cnscentz.net/info/what-are-the-main-components-of-a-vacuum-freez-96952156.html> (дата звернення: 24.10.2025).
8. What are the main components of a freeze dryer? [Electronic resource]. – URL: <https://www.biobaseoverseas.com/blog/what-are-the-main-components-of-a-freeze-dryer-115228.html> (дата звернення: 24.10.2025).
9. Яровий І. Технічна реалізація процесу комбінованого сушіння рослинної сировини / І. Яровий, О. Маренченко, В. Алі // *Scientific Works*. – 2024. – №88(1). – С. 113–121. – DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2969>.
10. Пилипенко Є.О. Механізми, кінетика та енергетика процесів зневоднення в умовах дії комбінованих мікрохвильових та інфрачервоних генераторів енергії: дис. ... доктора філософії: 133 – Галузеве машинобудування / Пилипенко Євген Олександрович. – Одеса, 2023. – 213 с.
11. Зозуляк І. А. Обґрунтування вибору принципової схеми сублимаційного СВЧ сушіння харчових продуктів / І. А. Зозуляк, Д. Г. Кондратюк, Д. О. Коробко // *Вібрації в техніці та технологіях*. – № 4 (115). – 2024. С. 60–60. – DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-8.
12. Rajashree V. An extensive investigation of combined freeze-drying technologies for fruit conservation / V. Rajashree, Vijai Silvana K.S., I. Muthuvel, Kavitha Shree G.G., A. Bharathi, Senthil Kumar M., P. Rajiv // *Plant Science Today*. – Vol. 11. – 2024. P. 1–14. – DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.5515>.
13. Датчики температури та тиску. Принципи, області застосування. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.weiliansensors.com/uk/news/temperature-and-pressure-sensors-principles-application-areas/> (дата звернення: 24.10.2025).
14. Martynenko Alex. Intelligent control in drying / Alex Martynenko, Bück Andreas. – London: CRC Press. – 2018. – 476 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429443183>.
15. Цвіркун Л. О., Омельченко О. В., Лісовий С. Р. Дослідження та оптимізація процесів конвективного сушіння бананів / Л. О. Цвіркун, О. В. Омельченко, С. Р. Лісовий // *Обладнання та технології харчових виробництв*. – №2. – 2024. С. 52–59.

References

1. Shutiuk V. V. Naukovo-metodolohichni zasady resursozberezhnykh enerhotekhnolohichnykh kompleksiv sushinnia kharchovykh produktiv: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.18.12 / Shutiuk Vitalii Volodymyrovych. – Kyiv, 2016. – 350 s.
2. Nwakuba N. R. Energy consumption of agricultural dryers: an overview / N. R. Nwakuba, S. N. Asoegwu, K. N. Nwaigwe // *AgricEngInt: CIGR Journal*. – 2016. – Vol. 18(4). – P. 119–132.
3. Rami Y. Jumah. Control of industrial dryers / Rami Y. Jumah, Arun S. Mujumdar, Vijaya G. S. Raghavan // *Handbook of Industrial Drying*. – 2006. – P. 597–610. – DOI: 10.1201/9781420017618.ch49.
4. Efficient contact drying MADE BY LÖDIGE. [Electronic resource]. – URL: <https://www.loedige.de/en/process/contact-drying/> (дата звернення: 24.10.2025).
5. Jude J. Application of Freeze-Drying in Food Processing and Storage – A Review / J. Jude, E. A. Adu, I. E. Maiyanga, O. S. Kamaldeen // *Badeggi Journal of Agricultural Research and Environment*. – 2023. – Vol. 05(02). – P. 21–35.
6. Chibuzo Stanley Nwankwo. Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration: A Review on Chemical and Sensory Qualities / Chibuzo Stanley Nwankwo, Endurance Oghogho Okpomo, Nesa Dibagar, Marta Wodecki, Wiktor Zwierz, Adam Figiel // *Foods*. – Vol. 12(18). – 2023. P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12183437>.
7. Yaki osnovni komponenty vakuumnoi sublimatsiinoi susharky. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://ua.cnsicentz.net/info/what-are-the-main-components-of-a-vacuum-freeze-96952156.html> (дата звернення: 24.10.2025).
8. What are the main components of a freeze dryer? [Electronic resource]. – URL: <https://www.biobaseoverseas.com/blog/what-are-the-main-components-of-a-freeze-dryer-115228.html> (дата звернення: 24.10.2025).
9. Yarovy I. Tekhnichna realizatsiia protsesu kombinovanoho sushinnia roslynnoi syrovyny / I. Yarovy, O. Marenchenko, V. Ali // *Scientific Works*. – 2024. – №88(1). – S. 113–121. – DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2969>.
10. Pylypenko Ye. O. Mekhanizmy, kinytyka ta enerhetyka protsesiv znevodnennia v umovakh dii kombinovanykh mikrokhvylovykh ta infrachervonykh heneratoriv enerhii: dys. ... doktora filosofii: 133 – Haluzeve mashynobuduvannia / Pylypenko Yevhen Oleksandrovych. – Odesa, 2023. – 213 s.
11. Zozuliak I. A. Obruntuvannia vyboru pryntsyypovoi skhemy sublimatsiinoho SVCh sushinnia kharchovykh produktiv / I. A. Zozuliak, D. H. Kondratiuk, D. O. Korobko // *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. – № 4 (115). – 2024. S. 60–60. – DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-8.
12. Rajashree V. An extensive investigation of combined freeze-drying technologies for fruit conservation / V. Rajashree, Vijai Silvana KS., I. Muthuvel, Kavitha Shree GG., A. Bharathi, Senthil Kumar M., P. Rajiv // *Plant Science Today*. – Vol. 11. – 2024. P. 1–14. – DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.5515>.
13. Datchyky temperatury ta tysku. Pryntsyypy, oblasti zastosuvannia. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.weiliansensors.com/uk/news/temperature-and-pressure-sensors-principles-application-areas/> (дата звернення: 24.10.2025).
14. Martynenko Alex. Intelligent control in drying / Alex Martynenko, Bück Andreas. – London: CRC Press. – 2018. – 476 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429443183>.
15. Tsvirkun L. O., Omelchenko O. V., Lisovyi S. R. Doslidzhennia ta optymizatsiia protsesiv konvektyvnoho sushinnia bananiv / L. O. Tsvirkun, O. V. Omelchenko, S. R. Lisovyi // *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv*. – №2. – 2024. S. 52–59.