

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Криворізький національний університет  
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського  
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ  
Гарант освітньої програми  
«Обладнання переробної і харчової  
промисловості»  
Хорольський В.П.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»  
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
за освітньою програмою «Обладнання переробної і харчової промисловості»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ  
СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ ЗАСОБІВ  
АВТОМАТИЗАЦІЇ»**

Виконав:  
здобувач вищої освіти Галінтовський Владислав Костянтинович  
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник: доцент, к.пед.н., Цвіркун Л.О.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у кваліфікаційній  
роботі немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Кривий Ріг  
2025



5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Обладнання для сушіння рослинної сировини.

Удосконалення сушильного обладнання на основі засобів автоматизації.

Структура інтелектуального управління процесом сушіння.

Дослідження сублімаційного процесу сушіння полуниці та бананів.

6. Дата видачі завдання «1» вересня 2025 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	4.09-20.09.2025 р.
2	Аналіз обладнання для сушіння рослинної сировини	21.09-18.10.2025 р.
3	Удосконалення сублімаційної сушарки засобами автоматизації	19.10-08.11.2025 р.
4	Аналіз результатів досліджень	09.11-15.11.2025 р.
5	Висновки по роботі	16.11-22.11.2025 р.
6	Оформлення роботи і подання до захисту	23.11-26.11.2025 р.

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_

(підпис)

Галінтовський В.К.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Цвіркун Л.О.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Обсяг і структура магістерської роботи. Повний обсяг магістерської роботи – 50 сторінка, в тому числі основного тексту – 46 сторінок. Робота містить: 10 рисунків. Список використаних джерел складається з 28 найменувань.

Об'єкт роботи – сублимаційне сушильне обладнання.

Предмет роботи – процес сушіння на основі засобів автоматизації.

Мета роботи – удосконаленню технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації.

У роботі зазначено, що метою будь-якого процесу сушіння є отримання твердого продукту бажаної якості при мінімальних витратах і максимальному потоці, а також забезпечення їх постійності. Якість означає, що продукт відповідає низці параметрів, кожен з яких знаходиться в установлених межах. Тому щоб досягти необхідних пропускних здатностей, підтримувати якість сировини та виконувати економічні обмеження контроль за процесами сушіння стає все більш важливим.

На основі аналізу, було зазначено, що сушильне обладнання можна поділити за різними критеріями враховуючи механізм сушіння: конвективні сушарки та контактні сушарки. Сконцентровано увагу на тому, що сушіння є енергоємним процесом і наразі витрачає приблизно чверть світового виробництва енергії, що є значним фактором в економіці виробництва. Тому упровадження ефективної та оптимізованої стратегії сушіння на основі засобів автоматизації можуть заощаджувати до 30% енергії порівняно з традиційною контрольованою системою.

Запропоновано удосконалення сублимаційної сушарки на основі засобів автоматизації. Розглянуто етапи сублимаційного сушіння: заморожування, первинне сушіння (сублимація) та вторинне сушіння (десорбція). Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик вологості всередині сушильної камери, що дозволяє визначити кінцеву точку первинного сушіння, запобігаючи пересушуванню або недосушуванню. Така точність первинної фази сушіння не лише скоротить час циклу та забезпечить стабільну якість продукції, а й безпосередньо впливатиме на тривалість вторинної фази сушіння, бо якщо залишкова вологість першої фази буде високою – це вплине на другу фазу сушіння, яка триватиме довше ніж потрібно для отримання якісної сировини.

У третьому розділі досліджено процес сублимаційного сушіння полуниці та бананів. Результати свідчать, що полуниця та банани, які підлягали сублимаційному сушінню у встановленому діапазоні температур від 30 до 60 градусів на полицях мали різку усадку та об'єм. Проте при нижчих температурах нагріву 30 і 40 градусів не було помітних відмінностей в кольорових характеристиках полуниці та банана. В умовах однакового сублимаційного сушіння полуниця є менш схильною до знебарвлення порівняно з бананом. Колір і об'єм сублимаційно висушеної полуниці не піддавалися змінам під час підвищення температури полиць на відміну від банану.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** процес сушіння, методи сушіння, сублимаційна сушарка, засоби автоматизації, енергоспоживання, рослинна сировина.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Методи сушіння рослинної сировини	9
1.2 Типи сушарок для рослинної сировини	9
1.3 Споживання енергії сушильного обладнання	14
1.4 Сушіння сировини із використанням сонячних панелей	17
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ СУБЛІМАЦІЙНОЇ СУШАРКИ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	23
2.1 Автоматизоване управління процесом сушіння	23
2.2 Контроль температури і тиску у процесі сублімаційного сушіння	27
2.3 Модифікація сушильного обладнання на основі засобів автоматизації	32
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1 Параметри, що впливають на процес сублімаційного сушіння	37
3.2 Дослідження сублімаційного процесу сушіння полуниці та бананів	39
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45
ДОДАТКИ	47

<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Галінтовський		
Перевір.		Цвіркун		
Н. Контр.		Омельченко		
Затверд.		Хорольський		
<b>Удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації</b>				
		Літ.	Арк.	Аркушіє
			5	1
<b>ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО</b>				

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** У роботі зазначено, що метою будь-якого процесу сушіння є отримання твердого продукту бажаної якості при мінімальних витратах і максимальному потоці, а також забезпечення їх постійності. Якість означає, що продукт відповідає низці параметрів, кожен з яких знаходиться в установлених межах. Тому щоб досягти необхідних пропускних здатностей, підтримувати якість сировини та виконувати економічні обмеження контроль за процесами сушіння стає все більш важливим.

**Мета та задачі дослідження.** Метою магістерської роботи є удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації.

**Практична та наукова новизна.** На основі аналізу, було зазначено, що сушильне обладнання можна поділити за різними критеріями враховуючи механізм сушіння: конвективні сушарки (волога з матеріалу зменшується за допомогою потоку сушильного газу) та контактні сушарки (матеріал контактує з гарячою поверхнею циліндричних камер). Сконцентровано увагу на тому, що сушіння є енергоємним процесом і наразі витрачає приблизно чверть світового виробництва енергії, що є значним фактором в економіці виробництва. Тому упровадження ефективної та оптимізованої стратегії сушіння на основі засобів автоматизації можуть заощаджувати до 30% енергії порівняно з традиційною контрольованою системою.

Запропоновано удосконалення сублімаційної сушарки на основі засобів автоматизації. Розглянуто етапи сублімаційного сушіння: заморожування, первинне сушіння (сублімація) та вторинне сушіння (десорбція). Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик вологості всередині сушильної камери, що дозволяє визначити кінцеву точку первинного сушіння, запобігаючи пересушуванню або недосушуванню. Така точність первинної фази сушіння не лише скоротить час циклу та забезпечить стабільну якість продукції, а й безпосередньо впливатиме на тривалість вторинної фази сушіння, бо якщо залишкова вологість першої фази буде високою – це вплине на другу фазу сушіння, яка триватиме довше ніж потрібно для отримання якісної сировини.

У третьому розділі досліджено процес сублімаційного сушіння полуниці та бананів. Результати свідчать, що полуниця та банани, які підлягали сублімаційному сушінню у встановленому діапазоні температур від 30 до 60 градусів на полицях мали різку усадку та об'єм. Проте при нижчих температурах нагріву 30 і 40 градусів не було помітних відмінностей в кольорових характеристиках полуниці та банана. В умовах однакового сублімаційного сушіння полуниця є менш схильною до знебарвлення порівняно з бананом. Колір і об'єм сублімаційно висушеної полуниці не піддавалися змінам під час підвищення температури полиць на відміну від банану.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Галінтовський</i>				<b>Удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						6	1
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				<b>ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО</b>			
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

### 1.1 Методи сушіння рослинної сировини

Сучасна обробка рослинної сировини переважно орієнтована на виробництво трав'яних ліків. Обробка рослинної сировини включає сушіння, яке є одним із найважливіших етапів збереження трав і найбільш енерговитратним процесом. Трави характеризуються різним вмістом біологічно активних речовин, тому вони широко використовуються в різних галузях промисловості. Раніше трави використовувалися в народній медицині, тепер вони широко використовуються в харчовій промисловості (спеції, соки). Сушіння – це найпоширеніший метод збереження різноманітної сировини. Одним із, що впливають на якість рослинної сировини після збору є стабілізація сировини, яка переважно пов'язана з процесом сушіння, який слід проводити в умовах, що не знижують якість рослин, а температуру та час сушіння слід адаптувати до конкретних видів рослин.

Збереження продуктів шляхом сушіння є звичайним способом, який використовується в харчовій промисловості. Основна функція сушіння полягає в зниженні водної активності продукту, щоб перешкоджати росту мікроорганізмів та зменшувати хімічні реакції, щоб подовжити термін зберігання сировини при кімнатній температурі. Вибір методу сушіння залежить від часу збору рослинного матеріалу, активних інгредієнтів, які необхідно зберегти. Процеси сушіння можна класифікувати відповідно до методу видалення води на осмотичне зневоднення, механічне осушення та термічне сушіння. У процесах осмотичного зневоднення застосовують розчин для видалення води, тоді як у механічному осушенні необхідне використання фізичної сили [1, 7, 4]. У процесі термальної сушки використовується газоподібне та порожнє середовище для видалення води з продукту харчування. Термальну сушку можна поділити на три категорії: сушіння повітрям, сушіння в умовах низького повітряного середовища та сушіння в модифікованій атмосфері. Існують фактори, які потрібно враховувати перед використанням будь-якого типу процесу сушіння. До них належать тип продукту, що підлягає сушінню, очікувані характеристики готової сировини та температурна продукту до тепла.

Сушіння в найширшому значенні – це процес видалення рідини із сировини, розчину або суспензії. Один з найдавніших методів консервування відомих людству, який застосовується майже у всіх аспектах повсякденного життя. Одна з основних одиничних операцій у процесі обробки продуктів харчування, які складають близько двох третин світового промислового

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Галінтовський</i>				<b>Удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						7	16
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				<b>ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО</b>			
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

виробництва. Сушіння є енергоємним процесом і наразі витрачає приблизно чверть світового виробництва енергії, що є значним фактором в економіці виробництва. Високі ціни та дефіцит викопного палива посилюють акцент на використанні альтернативних відновлюваних джерел енергії.

Сушіння є одним із методів, який використовується для збереження харчових продуктів на більш тривалий час. Тепло від сонця разом з вітром використовується для сушіння протягом декількох тисяч років. Термін сушіння з промислової точки зору розуміється як видалення рідини з твердої речовини, суспензії або розчину рідини термічними засобами. Його також можна визначити як процес видалення вологи за рахунок одночасного тепло- і масообміну. Мета сушіння полягає в тому, щоб видалити вологу з рослинної сировини, щоб її можна було безпечно переробляти та зберігати протягом тривалого часу. Сушіння сировини при оптимальних температурах та за короткий проміжок часу дозволяє зберігати більше поживної цінності, такої як вітамін С [1, 3, 7]. Додатковою перевагою є те, що продукти виглядають краще, що підвищує їхню ринкову привабливість і, отже, забезпечує кращі фінансові надходження. Процеси сушіння відіграють важливу роль у збереженні рослинної сировини. Вони визначаються як процес видалення вологи завдяки одночасному тепловому та масовому переносу. Процес теплового переносу вимагає подачі гарячого вентиляційного повітря до сировини для випаровування вологи, перетворюючи її на водяний пар, тоді як масовий перенос передбачає змішування водяного пару з сушильним повітрям та його подальшу транспортуванні зовні сушарки.

1. Природне або традиційне сушіння, відоме як сушіння на сонці полягає у простому викладенні продукту на сонці на дахах або сушильних поверхнях. Сушіння на сонці є одним із найстаріших методів сушки, що використовує сонячну енергію. Вона широко використовується для сушіння рослинної сировини, таких як лікарські рослини, у всьому світі. Сонячні сушарки можна класифікувати на прямі та непрямі. Використовуються як природні методи (активні та пасивні), що використовують тепло сонячної радіації та тепло, яке міститься в повітрі безпосередньо, так і теплові – переважно конвекційне сушіння [1-4]. Зазвичай деякий відсоток втрачається або пошкоджується, бо це трудомісткий процес, при якому відбувається втрата поживних речовин, таких як вітамін А і цей метод повністю залежить від сприятливих погодних умов. Оскільки енергетичні вимоги (сонце та вітер) легко доступні в навколишньому середовищі, потрібен невеликий капітал. Цей тип сушіння часто є єдиним комерційно використовуваним та життєздатним методом сушіння рослинної сировини у країнах, що розвиваються. Більш безальтернативним варіантом для відкритого сушіння на сонці є сонячні сушарки. Це більш ефективний метод сушіння, який забезпечує продукцію кращої якості але також вимагає початкових інвестицій. Якщо умови сушіння, такі як погода і постачання продуктів відповідні природна циркуляція сонячної енергії, сонячні сушарки здаються дедалі привабливішими як комерційна пропозиція.

Шукаючи шляхи зменшення енергоспоживання при сушінні рослинної сировини були розроблені сонячні колектори, які мають тепловий агрегат для нагрівання сушильного повітря в сушарках для трав. Залежно від атмосферних

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

умов та необхідних параметрів сушіння, сушарка отримує повітря з сонячного колектора або теплового агрегату [3]. Щоб максимізувати використання енергії сонячної радіації, повітря завжди подається до теплового агрегату після попереднього нагрівання в колекторі. Після проходження через колектор, повітря подається у камеру згоряння в нагрівальному агрегаті та в теплообмінну камеру, розташовану між камерою згоряння та входом повітря в сушарку. У разі сприятливих атмосферних умов (температура, вологість) повітря, нагріте в колекторі, може бути безпосередньо подане в сушарку.

2. Механічне сушіння використовує повітря та додаткове тепло, наприклад, електрична сушарка використовує вентилятор і нагрівальний елемент. Нагрівальний елемент генерує тепло, тоді як вентилятор продукує повітря, яке переносить та розподіляє повітря по всій камері.

## 1.2 Типи сушарок для рослинної сировини

Сушіння – один з методів, що використовуються для збереження продуктів харчування на більш тривалі терміни. Вона визнана найефективнішою технікою збереження для більшості рослинної сировини. Проте процес сушіння є найбільш енергоємним процесом серед усіх процесів. Ця ситуація найчастіше викликана необхідністю підтримувати кінетику процесу сушіння великих обсягів сировини з високою вологістю [1-4]. У випадку сушіння сипучих матеріалів проблема полягає у створенні сушарки для досягнення та підтримання бажаних параметрів сушіння (поверхня, вологість, температура) у сушарці при мінімальному постачанні сушильного агенту. Сушіння рослинної сировини відбувається за допомогою так званого конвекційного сушіння при низькій або середній температурі, при температурі повітря не вищій за 40°C. За цих умов сонячні колектори можуть бути альтернативою іншим штучним методам сушіння.

Сушильне обладнання можна поділити за різними критеріями, наприклад, враховуючи механізм сушіння: конвективні сушарки (волога з матеріалу зменшується за допомогою потоку сушильного газу) та контактні сушарки (матеріал контактує з гарячою поверхнею циліндричних камер). Досягнення економічно обґрунтованої кінетики сушіння насамперед визначає мету сушіння, знання фізичних та хімічних характеристик сушеної сировини і його кількості, а також правильний вибір типу сушарки та деталей її конструкції. Існує багато різних типів і варіацій сушарок і вибір правильної сушарки є важливим для досягнення бажаних результатів. Одна з більш поширених варіацій між сушарками – це джерело тепла.

1. Лоткові сушарки можуть висушити майже все, однак через трудомісткість, необхідну для завантаження та розвантаження їх використання є дорогим. Вони найчастіше знаходять застосування, коли йдеться про цінні продукти, такі як барвники та фармацевтичні препарати. Цей тип сушарки часто використовується для сушіння а різної рослинної сировини (рис. 1.1).

2. Роликова сушарку складається з циліндра, що нагрівається зсередини парою. Тонкий шар продукції розпилюється на зовнішній стороні циліндра і нагрівається в процесі обертання циліндра. Швидкість висихання і кінцевий

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

вміст води в продукції залежать від обертання ролика, тиску пари, товщини плівки та властивості продукту. Завдяки короткому часу контакту в поєднанні з високою температурою сушіння, роликочий сушитель добре підходить для термочутливих продуктів.

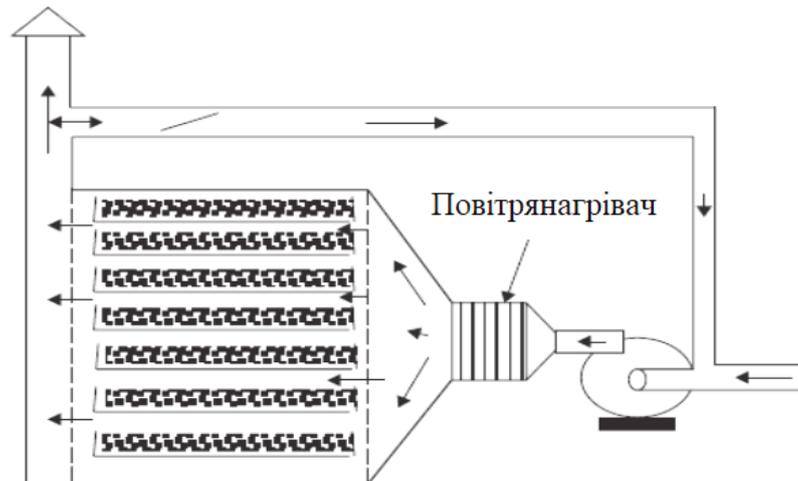


Рисунок 1.1 – Сушарка для піддонів/шаф

3. Сушарка-дегідратор – метод зберігання продуктів. Це м'який, природний процес, який видаляє вологу з їжі. Використовуючи контрольовану температуру, повітря циркулює з верхньої частини пристрою до кожної з п'яти лотків і основи. Цей метод сушіння зберігає аромати та поживні речовини їжі, залишаючи високу кількість поживних речовин та вітамінів. Природні здорові закуски можна легко створити за допомогою вашого дегідратора.

4. Флеш-сушарка використовує повітряні канали, які діють як контейнер для рівномірної передачі теплової енергії від гарячого газового потоку до продукту, насиченого вологістю з метою зменшення вологості продукту. Для правильного сушіння розмір частинок повинен бути однорідним і відносно малим. Вологий продукт вводиться в газовий потік, де волога швидко видаляється, а потім сухий продукт виводиться з газового потоку. Кільцева сушарка є варіантом флеш-сушарки, яка подрібнює продукт і потім переробляє його, щоб забезпечити однорідний розмір частинок і вологість продукту.

5. Пневматична сушарка використовується для продуктів, які швидко висихають завдяки легкому видаленню вільної води або там, де будь-яка необхідна дифузія на поверхню відбувається швидко. Сушіння відбувається за лічені секунди. Вологий матеріал змішується з потоком нагрітого повітря, який транспортує його через сушальний канал, де висока температура і швидкість масопередачі швидко висушують продукт. Застосування включає сушіння паст, шламів та суспензій та практично будь-який матеріал, де потрібен порошковий продукт. Основні характеристики такі [1]:

– дрібнодисперсні частинки можуть бути розсіяні, підняті і перекачані повітрям, якщо це повітря гаряче, матеріал висихає. Може знадобитися попереднє формування або змішування з висушеним матеріалом, щоб подати вологий матеріал;

– сухий продукт відділяється в циклоні. Потім слідує подальше відділення в інших циклонів, тканинних рукавних фільтрах або вологих скруберах.

Підходить для швидкого висушування термочутливих матеріалів. Липкі, жирні матеріали або ті, які можуть спричинити тертя (генерацію пилу) не підходять. Тип сушарки-розпилювача зазвичай є пневматичний/спалаховий сушарка.

6. Спрей-сушарки. Пневматична або «спалахова» сушка використовується для продуктів, які швидко обсихають через легке видалення вільної вологи або де будь-яка необхідна дифузія на поверхню відбувається легко. Сушка відбувається за кілька секунд. Волога сировина змішується з потоком гарячого повітря (або іншого газу), який переносить його через сушильний жолоб, де висока температура та швидкість масопередачі швидко сушать продукт.

7. Конвекційні сушарки є найпростішим способом сушіння харчової сировини, оскільки майже не потрібно спеціального обладнання. Сушіння гарячим повітрям – це найбільш поширений процес. Він, зокрема, дозволяє працювати в широкому діапазоні температур, досягаючи 90°C. Волога видаляється з сушарки шляхом обміну повітрям ззовні. Тепловий внесок може здійснюватися безпосередньо за допомогою пальника або побічно шляхом нагрівання батарей, які постачають гарячу воду, пару або будь-яку іншу термальну рідину. Сушіння належить до категорії методів повітряного сушіння, і в цьому процесі атмосфера використовується як сушильний середовищем, а тепло – як різні способи [1, 7, 4]. Сушильний середовищем, гаряче повітря, дозволяється проходити над продуктом, що був поміщений на відкриті підноси. Швидкість сушіння в умовах сушіння в печі залежить від температури, вологості, швидкості повітря і розподільчого малюнка, обміну повітря, геометрії та властивостей продукту та товщини. Як правило, чим вища температура повітря, тим швидше відбувається процес сушіння. Аналогічно, чим вища швидкість повітря, тим вища швидкість сушіння; чим нижча вологість повітря, тим вища швидкість сушіння. Відносна вологість (критерій сухості) виявляється нижчою, коли температура підвищується.

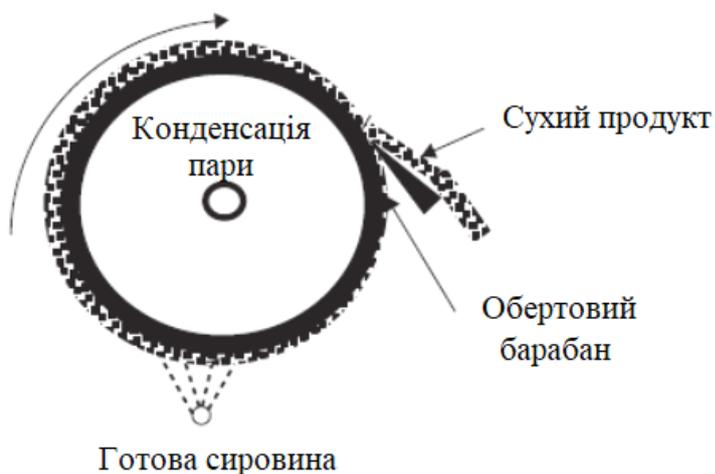
Перевагою такого методу сушіння є те, що всі піддони отримують рівномірне тепло, тому сушка є однорідною. Також цей метод швидший, ніж сушіння на сонці або використання сушарки для харчових продуктів. Сушка також забезпечує концентровану форму сушеної сировини та гальмує мікробний ріст ферментів. Метод широко використовують для неактивації ферментів під час обробки, наприклад, зеленого чаю.

8. Сонячні тунельні сушарки. Сонячна теплотехнологія – це технологія, яка швидко здобуває популярність як захід з економії енергії в в промисловості. Вона віддається перевага іншим альтернативним джерелам енергії, таким як вітер та сонце, оскільки вони є невичерпними та не забруднюючими. Сонячні повітряні обігрівачі – це прості пристрої для нагрівання повітря за допомогою сонячної енергії і вони використовуються в багатьох застосуваннях, які потребують низької або помірної температури до 80°C, таких як сушіння. Основними двома категоріями сушарок є природні конвекційні сонячні сушарки та примусово-конвекційні сонячні сушарки.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

У природних конвекційних сонячних сушарках повітряний потік встановлюється за рахунок повітряної циркуляції, в той час як у примусових конвекційних сонячних сушарках повітряний потік забезпечується за допомогою вентилятора, який працює або на електриці/сонячному модулі або на викопному паливі. Сонячне сушення може бути класифіковане на прямі та непрямі сонячні сушарки. У прямій сонячній сушарці повітряний обігрівач містить зерна, а сонячна енергія проникає через прозору кришку і поглинається зернами. В основному, тепло, необхідне для сушіння, забезпечується радіацією на верхні шари і подальшою теплопередачею.

9. Ротаційна сушарка. У ротаційній сушарці використовується обертовий циліндричний барабан, який виступає в якості ємності для рівномірної передачі теплової енергії від гарячого газового потоку до насиченого вологою продукту, з метою зниження вологості в продукті. Вологий продукт вводиться у вхідний отвір барабана, де він сушиться, потрапляючи на вихідний отвір барабана. Барабан оснащений прольотами для розсіювання продукту в потік сушильного газу при обертанні барабана [1-4]. Продукт може транспортуватися пневматично або самопливом, якщо барабан знаходиться на схилі (рис. 1.2). Існує кілька різних типів роторних сушарок, і їх можна використовувати в багатьох різних сферах застосування. Ротаційна сушарка складається з циліндричної оболонки, горизонтальної або злегка нахиленої до вихідного отвору. Вони нагріваються за рахунок прямого контакту повітря або газу з твердими речовинами; шляхом гарячих газів, що проходять через зовнішню оболонку або завдяки конденсації пари в наборі поздовжніх труб, встановлених на внутрішній поверхні оболонки.



Продукт подається в верхній отвір і транспортується під час змішування через циліндр. Незалежно від способу обігріву вода видаляється разом з повітрям. Недоліком ротаційних сушарок є великі втрати потужності, які виникають, якщо продукт має дрібнозернисту структуру.

Рисунок 1.2 – Барабанна сушарка

Ротаційні сушарки використовують обертальний рух у поєднанні з сушильним повітрям для ефективного висушування матеріалів. Найчастіше ротаційні сушарки є типу прямого спалювання, що означає, що сушильне повітря безпосередньо контактує з матеріалом. Однак деякі сушарки є непрямого типу, коли сушарка обігрівается зовнішнім джерелом, що запобігає прямому контакту між матеріалом і сушильним повітрям.

10. Сублимаційна сушарка. Сушіння методом сублимації потрапляє під методи сушіння в умовах низького повітря. Під час даного методу заморожений харчовий матеріал підлягає тиску нижче 610 Па при 0°C, нагрівається для викликання сублимації льоду в пару. Метод використовують для високоякісних сухих продуктів, які містять термочутливі компоненти, такі як вітаміни, антибіотики та мікробна культура [7]. Процедура продовжує строк придатності, запобігаючи росту мікробів і уповільнюючи окислення ліпідів. Відсутність повітря та низька температура запобігають псуванню через окислення або хімічну модифікацію продукту. Сушка методом сублимації є відмінно рекомендованим методом сушки для збереження якості активних інгредієнтів. Однак, його енергоспоживання є надмірним у порівнянні з іншими методами сушіння.

11. Мікрохвильове сушіння. Сушіння в мікрохвильовій печі – це відносно новий альтернативний метод сушіння порівняно з традиційним сушінням. Він є швидким, більш рівномірним, енергоефективним, оптимально використовує простір, запобігає розкладу продуктів харчування та має великий потенціал для переробки рослинної сировини. Технологія має ключову перевагу в обігріві над традиційним обігрівом завдяки енергії мікрохвиль. Великий інтерес до цієї технології зумовлений високою здатністю цих хвиль проникати, нагріваючи не лише поверхню, а й внутрішню частину продуктів. Це прискорює процес сушіння і може покращити якість кінцевого продукту [4, 7]. Вона широко використовується в харчова промисловість завдяки скороченню часу та витрат на обробку, покращенню однорідності продукту та виходу, покращенню унікальної мікроструктури та захисту їжі від потемніння поверхні та утворення скоринки.

12. Сушіння за допомогою теплового насоса. Сушарки з тепловими насосами або сушарки з осушенням використовують лише один джерело енергії – електрику. Цей тип сушарки обладнаний холодильним блоком, що складається з холодної котушки, випарника, гарячої котушки та конденсатора. Тепловий насос споживає більше електричної енергії, ніж теплової енергії, яку він постачає. Існує два процеси для сушарок з тепловими насосами:

- закритий контур – немає обміну повітря з зовнішнім середовищем;
- відкритий контур – обмін повітря здійснюється з зовнішнім середовищем для зниження температури в кімнаті для сушіння.

Рівні температури нижчі, ніж у сушарок гарячого повітря з кондиціонуванням і мають довший час сушіння.

13. Вакуумні сушарки. Вакуумний сушарка є герметичною конструкцією у якій тиск знижений вакуумним насосом. Це комбіновані дії тиску і температури, які прискорюють циркуляцію води в продуктах і інтенсифікують випаровування. Вакуумна сушка, таким чином, підходить для матеріалів, чутливих до тепла і кисню. Під час вакуумної сушки швидкість випаровування збільшується (при фіксованій температурі), оскільки температура кипіння води зменшується. Ефективна гідравлічна провідність матеріалу збільшується під вакуумом, тому опір масовому переносу на поверхні продукту зменшується. Вакуумна сушка, відповідно, вимагає менше часу на сушку, ніж традиційна

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		13

сушка гарячим повітрям і в більшості випадків призводить до отримання продукту з вищою якістю.

### 1.3 Споживання енергії сушильного обладнання

Багато рослинної сировини мають короткий період зберігання і їх потрібно консервувати та зберігати для подальшого використання. Видалення вологи – це типовий підхід до консервування. Штучне сушіння широко використовується для видалення вологи та поліпшення зберігання і якості сировини. Застосовуючи відповідні методи сушіння, можна збільшити якість продукції та зменшити втрати. Теорія та технологія сушіння значно розвинулися, що призвело до розробки різних систем сушіння з різною енергетичною ефективністю та продуктивністю. Проте споживання енергії сушарками є важливою технічною інформацією, необхідною для оптимального проектування та економічної експлуатації, а також для правильного забезпечення оптимальних умов зберігання рослинної сировини.

Хоча сушіння відомо своєю енергоємністю, окрім теплоти випаровування видаленої вологи, енергія витрачається на нагрівання твердого матеріалу та на нагрівання використовуваного сушильного середовища. Незалежно від того, чи це частина процесу, чи просто як метод консервування харчових продуктів сушарці потрібна відносно велика кількість енергії для виконання цієї операції. Висока вартість є прямим наслідком високої прихованої теплоти випаровування води ( $2,26 \times 10^6$  Дж/кг), яка найчастіше є водою, що видаляється з продукту під час процесу сушіння. Хоча питома теплоємність продукту достатньо нижча за приховану теплоту випаровування води вартість енергії забезпечує сильний стимул для винаходу процесів, які дозволять ефективно використовувати енергію [2, 5, 13]. Сушарки є одним з найважливіших обладнань у харчовій переробній промисловості. Різні типи сушарок були розроблені та використовуються для сушіння рослинної сировини для покращення їх терміну зберігання. Більшість із цих сушарок, незалежно від їх конфігурації, використовують дорожче джерело енергії, таке як електрика, мікрохвильова енергія, інфрачервона енергія, зріджений газ або комбінацію сонячної енергії та інших форм енергії. Конвективне повітряне сушіння є найпоширенішим методом сушіння всіх видів харчових продуктів. Це може бути у формі активної сонячної конвективної, мікрохвильово-конвективної, електрично-конвективної, теплового насоса та гібридних конвективних сушарок, які можуть бути комбінацією будь-якого з чотирьох типів.

Через низьку теплопровідність харчових матеріалів у період висихання з уповільненою швидкістю. Передача тепла до внутрішніх секцій харчових матеріалів під час звичайного нагрівання обмежена. Це явище призводить до високого споживання енергії сушаркою. У сушарках висушування відбувається шляхом постачання тепла до вологого матеріалу, що призводить до випаровування рідкого вмісту. Зазвичай тепло може постачатися конвекцією (прямі сушарки), кондукцією (контактні або непрямі сушарки) та радіацією або об'ємно шляхом розміщення вологого продукту в мікрохвильовому або радіочастотному електромагнітному полі. Більшість промислових сушарок є

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

конвективного типу де нагріте повітря або газу від прямого згоряння слугують сушильним середовищем. Практично всі застосування сушіння включають видалення води.

Усі способи, окрім діелектричних (мікрохвильових і радіочастотних), постачають тепло на межах сушильного продукту, щоб тепло могло дифундувати в твірний продукт переважно шляхом теплопровідності. Рідина повинна подорожувати до межі сушильного продукту, перш ніж вона буде перенесена носієм, яким у більшості випадків є газ (або через вакуум для неконвективних сушарок). Традиційно гарячий повітряний сушарка складається з п'яти основних компонентів: нагрівача повітря, переміщувача повітря, системи повітроводів, димоходу та шафи, що утримує продукт. Окрім властивостей сушильного повітря та змінних культур, енергетичне споживання сушарок для рослинної сировини в основному залежить від місткості та типу пристроїв для нагрівання та переміщення повітря (за умови відсутності втрат тепла до стін і відповідно низької ефективності) [2, 5, 13]. Вибір ефективної системи сушіння є необхідним для зменшення енергоспоживання сушарки для рослинної сировини під час процесу дегідратації, а також для мінімізації деградації якості сушених продуктів. Процес сушіння має бути таким, щоб змінювати якісні показники продуктів якомога менше. Ці показники включають фізичні аспекти, такі як розміри та форма, текстура, контури та жорсткість, а також хімічні зміни, такі як реакції потемніння, зміна кольору, зміни у вітамінах, амінокислотах та окислення речовин.

Багато штучних сушарок використовують принцип сушіння гарячим повітрям, де повітря підігрівається внаслідок спалювання викопного пального, електрики та сонячної енергії, перед тим як бути примусовим через продукти сушіння. Джерела тепла можуть бути в одному або в комбінації для процесу сушіння. Однак ці типи сушарок вимагають високих енергетичних витрат через їхню неефективність. Термічна ефективність сушарки вважається співвідношенням між мінімальною кількістю тепла, необхідною для сушіння певної маси сировини, та фактично використаним теплом; тобто, теоретична енергія, необхідна для видалення вологи, яка відображає мінімальну енергію, необхідну для сушіння продуктів, зазвичай порівнюється з питомим споживанням тепла.

Для оцінки енергетичної ефективності сушарки її теплова ефективність (коефіцієнт використання тепла) та специфічне енергоспоживання розглядаються шляхом ділення загальної енергії, що постачається до сушарки, на масу випарованої води. Споживання енергії рослинної сушарки у великій мірі є функцією дизайну/типу сушарки та навколишніх умов середовища. Рослинні сушарки споживають значно більше енергії через свої одиниці тепlopостачання [2, 5, 13]. Споживання енергії можна зменшити за рахунок відновлення тепла. Найпростіша форма відновлення тепла – це рециркуляція вихідного повітря. Науковцями запропоновано, що коли доступний простір для повітроводів і відстань між входом і виходом не надто велика, частину вихідного повітря можна направити назад до входу джерела тепла, що попередньо нагріває вхідне повітря і таким чином зменшує споживання енергії сушарки в цей момент.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Однак окремі сушарки для рослинних культур можуть споживати різну кількість енергії на одиницю маси води, що випаровується, незалежно від джерела тепла чи кількості джерел тепла: одно- або гібридних. Тому корисно розглянути споживання енергії для загального випадку. Таким чином, всі можливі елементи споживання та забезпечення енергією в сушінні рослинних продуктів, які з'являються в різних комбінаціях у специфічних системах сушіння, можуть бути перераховані наступним чином [2, 5, 13]:

– тепло, необхідне для випаровування води з продукту, яке безпосередньо та незмінно визначається об'ємом культур, питомою вагою та очікуваною зміною відсотка вологості (вимірюється у сухій вазі).

– втрата тепла від структур сушарки внаслідок проведення тепла з високотемпературного бар'єру через стіни, стелю та підлогу до регіонів з нижчою температурою ззовні;

– втрата тепла, пов'язана з повітрям вентиляції, яке використовується для видалення води з сушарки (та втрата повітря з протікання сушарки, що перевищує необхідну вентиляцію);

– чутливе тепло, необхідне для нагрівання продукту та камери сушіння до температури сушіння. Електрична енергія, необхідна для руху повітря: у сушарках для сільськогосподарських продуктів фактичний попит на енергію для циркуляції повітря варіюється залежно від швидкості повітря, ширини упаковки та природи матеріалу, що сушиться.

Споживання енергії різних сушарок. Було проведено низку досліджень, щодо оцінки споживання енергії для деяких поширених типів сушарок, таких як: мікрохвильові сушарки, інфрачервоні сушарки з вакуумним насосом, сонячні сушарки та гібридні сушарки. Ці сушарки споживають різні кількості енергії в залежності від типу культури, що сушиться, та бажаного рівня вологості на виході. При оцінці енергетичної ефективності сушарки враховуються її тепловий коефіцієнт і специфічне споживання тепла, які обчислюються шляхом ділення загальної енергії, що подається на масу випарованої води. Реальне споживання енергії оцінюється з врахуванням співвідношення теплового коефіцієнта і споживання енергії. Це споживання енергії можна зменшити за рахунок повторного використання тепла витяжного повітря.

1. Мікрохвильові сушарки. У мікрохвильовій сушці швидке поглинання мікрохвильової енергії зразком культури залежить від вмісту вологи в матеріалі, що призводить до швидкого випаровування внутрішньої води та забезпечує значну економію енергії, а також продукцію високої якості [2]. Висока вологість під час першої фази сушіння призводить до вищих витрат енергії у вигляді мікрохвильової потужності та вищих швидкостей сушіння, що, в свою чергу, сприяє дуже високій енергоефективності завдяки вищій дифузії вологи. Внаслідок цього у процесі сушіння втрата вологи в продукті призвела до зниження споживання енергії (абсорбції потужності) мікрохвильової сушарки.

2. Вакуумні інфрачервоні сушарки. Інфрачервоне випромінювання є формою електромагнітного випромінювання, поглинання якого викликає теплові коливання в харчових продуктах. Це один з найкращих методів сушіння

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

тонким шаром рослинної сировини. Сушіння під вакуумом зазвичай проводиться при низькій температурі. Цей тип сушарки нещодавно отримав багато уваги як альтернативна техніка сушіння завдяки мінімальним втратам енергії під час процесу. Вони характеризуються виробництвом продукції високої якості, високою енергетичною ефективністю та високим теплом [2]. Швидкість переносу вологи зменшує час сушіння. Коли інфрачервоне випромінювання використовується для нагрівання або сушіння вологого матеріалу, енергія випромінювання проникає через сировину і перетворюється на тепло. Оскільки матеріал нагрівається швидко і більш рівномірно, а енергія інфрачервоного випромінювання передається від нагрівального елемента до продукту без нагрівання навколишнього повітря, споживання енергії в інфрачервоних сушильниках відносно низьке в порівнянні з сушінням гарячим повітрям. Сьогодні інфрачервоне випромінювання застосовується в декількох сушильниках, оскільки має переваги підвищеної ефективності сушіння та економії простору.

3. Сонячні сушарки. Сонячне сушіння рослинної сировини відоме своїм неенергоємним процесом, особливо відкритим сонячним сушінням через його низьку теплову ефективність. Сонячні сушарки можуть заощаджувати більше енергії в порівнянні з іншими промисловими сушарками, оскільки вони використовують доступну сонячну енергію. Більш того, менші часи сушіння та собівартість, ошадність простору, вища якість продукції, екологічність, менші викиди CO<sub>2</sub> та вища ефективність. Під час сушіння вологість продукту знижується, що призводить до зменшення енергетичних витрат.

Аналіз наукових джерел дав змогу встановлено, що енергоспоживання мікрохвильових сушарок має близько 70% економії енергії в порівнянні з іншими конвективними сушарками через їх низьке енергоспоживання при високій потужності але вартість експлуатації мікрохвильових сушарок на рекомендованому рівні потужності близько 500 Вт для сушіння тонких шарів ускладнює їх використання, оскільки це призводить до вищих енергетичних витрат у вигляді щільності потужності мікрохвиль [2, 5, 13]. Енергоспоживання варіюється в залежності від типу сушарки, умов сушіння та типу продукту, що сушиться. Для гарячого повітря у сушарках це збільшується з підвищенням швидкості повітря та часу сушіння, а також зменшується з температурою. Воно також експоненціально зменшується з часом сушіння та вмістом вологи для різних геометрій зразків. У мікрохвильових сушарках змінюється обернено до температури за постійній швидкості повітря. Вакуумно-інфрачервона сушарка показує, що загальне споживання енергії змінюється обернено до потужності мікрохвиль та товщини зрізу зразків сировини і збільшується зі збільшенням абсолютного тиску.

#### 1.4 Сушіння сировини із використанням сонячних панелей

Харчова промисловість відіграє вирішальну роль у забезпеченні світового попиту на продукти харчування, водночас суттєво впливаючи на споживання енергії та екологічний вплив. Оскільки світ стикається з викликами зміни клімату та необхідністю стійких енергетичних рішень, інтеграція

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17

відновлювальних джерел енергії в харчові переробні підприємства стала багатообіцяючим шляхом для вирішення як екологічних так і економічних питань [10-12]. Сонячна енергія набрала значну популярність як життєздатне джерело відновлювальної енергії для підприємств з переробки продуктів харчування. Сонячна енергія – це відновлювальне джерело енергії, яке отримане з електромагнітного випромінювання Сонця. Це відновлювальне джерело енергії, оскільки воно отримується з природного і невичерпного джерела, в даному випадку – Сонця. Сонячну енергію можна збирати за допомогою фотоелектричних елементів (які складають всіма відомі фотогальванічні панелі), геліостатів або сонячних колекторів, які потім перетворюють її на сонячну теплову енергію (через температуру) або сонячну фотогальванічну енергію (через світло). Також її можна використовувати пасивно за допомогою біокліматичної та сталої архітектури, як ми побачимо далі.

Сонячна енергія є одним з найпростіших відновлюваних джерел енергії, особливо сонячна фотогальваніка, що сприяє розширенню її використання в кліматичних зонах з більшою кількістю сонячних годин. Це пристрої-збирачі, розроблені для збору енергії, що надходить від сонця і перетворення її в теплову енергію, поділені за температурою на низькотемпературні та високотемпературні, що складаються з корисних елементів для виробництва електричної енергії.

Сонячна теплова енергія використовує енергію сонця для виробництва тепла, яке потім використовується як джерело енергії як на домашньому, так і на промисловому рівні, перетворюючи цю енергію в механічну енергію, а з неї в електричну енергію. У випадку домашньої енергії – це установки сонячної теплової системи низької температури, з установкою, що складається з колекторів або сонячних приймачів на даху або в сонячній частині будівлі. Вони захоплюють сонячну радіацію і перетворюють її на тепло, яке проходить через систему металевих труб, що генерує достатньо енергії для звичайного використання в домогосподарстві: гаряча вода та опалення [8, 9]. Але сонячну теплову енергію також можна використовувати в великих масштабах. Йдеться про термосонячну електростанцію або сонячну теплову електростанцію, великі площі землі з колекторами високотемпературної сонячної енергії. Вони перетворюють теплову енергію на електричну, щоб постачати традиційну електричну мережу, охоплюючи великі території. Крім того, сучасні технології дозволяють зберігати тепло дуже економічно, що дає можливість перетворити його на електрику, коли це необхідно, регулюючи таким чином виробництво.

На відміну від сонячної теплової енергії, сонячна фотогальваніка полягає в безпосередньому отриманні електричної енергії з сонячної радіації. Це досягається завдяки встановленню сонячних фотогальванічних панелей, які мають кремнієві елементи, що перетворюють світло та тепло сонця на електрику. Так само, як і у випадку з сонячною тепловою енергією, ці панелі або сонячні плити можуть встановлюватися як на рівні домогосподарств у будівлях і будинках, так і на великих установках – відомих як фотогальванічні станції. Сонячні колектори також відомі як сонячний приймач – це будь-який пристрій, призначений для збору енергії, що випромінюється сонцем, і

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

перетворення її на теплову енергію. Колектори відповідно до температури, яку досягає робоча рідина, поділяються на дві великі групи: колектори низької температури, які здебільшого використовуються в домашніх системах опалення та колектори високої температури, що формуються за допомогою дзеркал і зазвичай використовуються для виробництва електричної енергії.

Колектори низької температури – це плоский сонячний колектор, який також називається тепловою сонячною панеллю, що складається з плоскої металевої коробки, через яку циркулює рідина, що нагрівається на її шляху через панель. Вона може бути захищена плоским колектором зі скла, що обмежує втрати тепла. Незахищений, а саме плоский сонячний колектор працюють, використовуючи ефект теплиці, той самий принцип, який можна відчувати, увійшовши до припаркованого автомобіля на сонці влітку. Скло діє як фільтр для певних довжин хвиль сонячного світла, пропускаючи, в основному, видиме світло, і є менш прозорим для інфрачервоного випромінювання з меншою енергією [8, 9-12]. Сонце впливає на скляну поверхню колектору, яка, будучи дуже прозорою для довжини хвилі видимої радіації, пропускає більшу частину енергії. Потім вона нагріває колекторну пластину, яка, в свою чергу, перетворюється на джерело радіації в довгих хвилях або (інфрачервоному), менш енергетичному. Але оскільки скло є дуже непрозорим для цих довжин хвиль, незважаючи на втрати під час передачі, (скло є поганим термічним ізолятором), простір коробки нагрівається вище зовнішньої температури. Проходячи через коробку, рідина, що циркулює по трубопроводах, нагрівається і переносить цю теплову енергію туди, де це потрібно.

Ефективність колекторів покращується при зниженні робочої температури, оскільки при вищій температурі в коробці (по відношенню до зовнішньої) більші будуть втрати тепла через скло. Також, при вищій температурі приймальної пластини її випромінювання буде більш енергетичним, і скло стане більш прозорим для нього, що, в свою чергу, знижує ефективність колектора. Плоскі сонячні колектори не є технологічно складними, тому їхній потенціал для розвитку є дуже обмеженим. Проте наразі вони здатні захоплювати до 80% енергії, отриманої від сонця.

Сонячна панель або сонячна пластина є пристроєм, що захоплює сонячну енергію для початку процесу перетворення в сталу енергію. Напівпровідниковий матеріал, яким він покритий, зазвичай є кремнієм, основним елементом для кожної з сонячних елементів, чутливий до світла і генерує електрику при отриманні сонячної радіації завдяки фізичному явищу, відомому як фотоелектричний ефект. Фотоелектричні модулі складаються з окремих фотоелектричних елементів, з'єднаних між собою [8, 9]. Для забезпечення правильного ухилу та орієнтації щодо сонячного світла модулі встановлюються на спеціальні опорні конструкції. Два вихідних термінали в кожному модулі збирають і передають електричний струм, що генерується, до систем управління сонячною електростанцією. Ефективність фотогальванічного модуля – це співвідношення між електричною потужністю виходу на клемах і потужністю сонячної радіації, що падає на поверхню модуля. Стандартне значення, яке використовується як еталон для вказівки сонячної радіації – 1000 Вт/м<sup>2</sup>, якщо на кожен квадратний метр припадає 1000

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

ват енергії сонця, відсоток енергії, що насправді перетворюється в використовувану електрику, становить ефективність. Середній термін служби фотогальванічного модуля становить близько 25 років.

Фотоелектричне сонячне сушіння – це метод, який використовує сонячну енергію через фотоелектричні елементи для живлення систем сушіння. Цей інноваційний підхід поєднує технологію відновлюваної енергії з традиційними методами сушіння, що призводить до підвищення ефективності та зниження впливу на навколишнє середовище. Фотоелектричний елемент, який часто називають сонячним елементом, перетворює сонячне світло безпосередньо в електрику. При інтеграції в сушильне обладнання ці комірки полегшують видалення вологи з таких продуктів, як фрукти, овочі, зернові та трави, покращуючи термін зберігання та зберігаючи якість [8-12]. Важливість цього методу неможливо переоцінити, оскільки він підтримує стале сільське господарство та практики збереження харчових продуктів. Традиційні процеси сушіння часто покладаються на викопне паливо або електроенергію, отриману з невідновлюваних джерел, що генерує парникові гази та збільшує експлуатаційні витрати. Перейшовши на фотоелектричне сонячне сушіння, виробники можуть значно зменшити свій вуглецевий слід, а також отримати економічну вигоду.

Категорія сушарок є частиною групи сонячних сушарок з непрямим світлом і примусовою вентиляцією. Ці моделі характеризуються тим, що енергія примусової вентиляції постачається фотогальванічною панеллю, і, отже, пристрій є повністю автономним з точки зору енергії (рис.1.3).

Такий вид сушарок задовольняє низку умов для оптимального сушіння:

- сушіння на сонці для отримання яскравішого кольору продукту, схожого на колір свіжого продукту, та високого вмісту вітамінів;

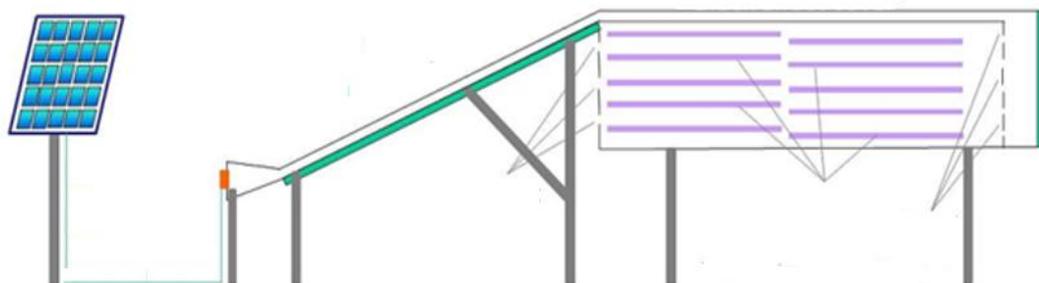


Рисунок 1.3 – Сушіння сировини із використанням сонячних панелей

- повна енергетична незалежність
- можливість переміщення установки на виробничі майданчики та її використання на місці, щоб уникнути втрати продукту через тепло під час транспортування
- гарна потужність сушіння та помірна ціна.

Основна перевага фотоелектричного сонячного сушіння полягає в його енергоефективності. Традиційні методи сушіння не тільки енергоємні, але й сприяють збільшенню витрат через залежність від електроенергії, що постачається від мережі, або викопного палива. На противагу цьому,

використання сонячної енергії різко зменшує ці витрати. Інвестиції в фотоелектричні сонячні панелі зазвичай призводять до зниження експлуатаційних витрат з часом, оскільки збір сонячного світла вимагає мінімальних поточних витрат. Використання цього методу забезпечує рівень енергетичної незалежності, який не можуть запропонувати звичайні методи. Виробники, які впроваджують фотоелектричні сонячні системи сушіння, можуть отримати доступ до великої кількості сонячного світла для задоволення своїх потреб у сушінні, особливо в регіонах, де електропостачання може бути ненадійним або дорогим.

Збереження якості продукції є ще однією помітною перевагою фотоелектричного сонячного сушіння. Техніка дозволяє контролювати температури сушіння, які мають вирішальне значення для підтримки поживних і сенсорних властивостей їжі. Високі температури, які часто зустрічаються при традиційних методах сушіння, можуть призвести до розкладання основних вітамінів і мінералів, що негативно впливає на загальну якість продукту [8]. Використовуючи фотоелектричне сонячне осушення, можна зменшити вміст вологи без надмірного нагрівання. Цей більш делікатний процес сушіння допомагає зберегти яскравий колір, природний смак і поживну цілісність фруктів, овочів і трав, роблячи кінцевий продукт більш бажаним для споживачів. Крім того, зменшення псування завдяки точному контролю вологості призводить до зменшення кількості відходів і вищої рентабельності для виробників.

На основі вище зазначеного можна вважати, що одним із факторів, що впливають на якість рослинної сировини після збору є стабілізація сировини, яка переважно пов'язана з процесом сушіння, який слід проводити в умовах, що не знижують якість рослин, а температуру та час сушіння слід адаптувати до конкретних видів рослин. Основна функція сушіння полягає в зниженні водної активності продукту, щоб перешкоджати росту мікроорганізмів та зменшувати хімічні реакції, щоб продовжити термін зберігання сировини при кімнатній температурі. Вибір методу сушіння залежить від часу збору рослинного матеріалу, активних інгредієнтів, які необхідно зберегти. Процеси сушіння можна класифікувати відповідно до методу видалення води на осмотичне зневоднення, механічне осушення та термічне сушіння. У процесах осмотичного зневоднення застосовують розчин для видалення води, тоді як у механічному осушенні необхідне використання фізичної сили.

Зазначено, що сушильне обладнання можна поділити за різними критеріями, наприклад, враховуючи механізм сушіння: конвективні сушарки (волога з матеріалу зменшується за допомогою потоку сушильного газу) та контактні сушарки (матеріал контактує з гарячою поверхнею циліндричних камер). Досягнення економічно обґрунтованої кінетики сушіння насамперед визначає мету сушіння, знання фізичних та хімічних характеристик сушеної сировини і його кількості, а також правильний вибір типу сушарки та деталей її конструкції. Існує багато різних типів і варіацій сушарок і вибір правильної сушарки є важливим для досягнення бажаних результатів.

Сушіння є енергоємним процесом і наразі витрачає приблизно чверть світового виробництва енергії, що є значним фактором в економіці

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

виробництва. Розглянуто споживання енергії різними сушарками задля оцінки споживання енергії для деяких поширених типів сушарок, таких як: мікрохвильові сушарки, інфрачервоні сушарки з вакуумним насосом, сонячні сушарки та гібридні сушарки. Ці сушарки споживають різні кількості енергії в залежності від типу культури, що сушиться, та бажаного рівня вологості на виході.

Аналіз наукових джерел дав змогу встановлено, що енергоспоживання варіюється в залежності від типу сушарки, умов сушіння та типу продукту, що сушиться. Для гарячого повітря у сушарках збільшується з підвищенням швидкості повітря та часу сушіння, а також зменшується з температурою. Воно також експоненціально зменшується з часом сушіння та вмістом вологи для різних геометрій зразків. У мікрохвильових сушарках змінюється обернено до температури за постійній швидкості повітря. Вакуумно-інфрачервона сушарка показує, що загальне споживання енергії змінюється обернено до потужності мікрохвиль та товщини зрізу зразків сировини і збільшується зі збільшенням абсолютного тиску.

Шукаючи шляхи зменшення енергоспоживання при сушінні рослинної сировини були розроблені сонячні колектори, які мають тепловий агрегат для нагрівання сушильного повітря в сушарках для трав. Залежно від атмосферних умов та необхідних параметрів сушіння, сушарка отримує повітря з сонячного колектора або теплового агрегату. Щоб максимізувати використання енергії сонячної радіації, повітря завжди подається до теплового агрегату після попереднього нагрівання в колекторі. Після проходження через колектор, повітря подається у камеру згоряння в нагрівальному агрегаті та в теплообмінну камеру, розташовану між камерою згоряння та входом повітря в сушарку. У разі сприятливих атмосферних умов (температура, вологість) повітря, нагріте в колекторі, може бути безпосередньо подане в сушарку.

Сонячна енергія – це відновлювальне джерело енергії, яке отримане з електромагнітного випромінювання Сонця. Це відновлювальне джерело енергії, оскільки воно отримується з природного і невичерпного джерела, в даному випадку – Сонця. Сонячну енергію можна збирати за допомогою фотоелектричних елементів (фотогальванічні панелі), геліостатів або сонячних колекторів, які потім перетворюють її на сонячну теплову енергію (через температуру) або сонячну фотогальванічну енергію (через світло).

Аналіз наукових джерел дав змогу узагальнити, що фотоелектричне сонячне сушіння – це метод, який використовує сонячну енергію через фотоелектричні елементи для живлення систем сушіння. Цей інноваційний підхід поєднує технологію відновлюваної енергії з традиційними методами сушіння, що призводить до підвищення ефективності та зниження впливу на навколишнє середовище. Фотоелектричний елемент, який часто називають сонячним елементом, перетворює сонячне світло безпосередньо в електрику. Традиційні процеси сушіння часто покладаються на викопне паливо або електроенергію, отриману з невідновлюваних джерел, що генерує парникові гази та збільшує експлуатаційні витрати. Перейшовши на фотоелектричне сонячне сушіння, виробники можуть значно зменшити свій вуглецевий слід, а також отримати економічну вигоду.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

## РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ СУБЛІМАЦІЙНОЇ СУШАРКИ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 2.1 Автоматизоване управління процесом сушіння

Сушіння є однією з найстаріших технік консервування, що відомі людству. Хоча воно застосовується вже тисячоліттями все ще ставить виклики сьогодні щодо збереження ключових компонентів висушеного матеріалу, ще більше, якщо матеріал підлягає великомасштабному сушінню та зазнає сезонних або локальних змін у складі. Метою будь-якого промислового процесу сушіння є отримання твердого продукту бажаної якості при мінімальних витратах і максимальному потоці, а також забезпечення їх постійності. Якість означає, що продукт відповідає низці технічних, хімічних і біологічних параметрів, кожен з яких знаходиться в установлених межах. Таким чином, вивчення процесів сушіння є одночасним вивченням теплового та масового перенесення. Щоб досягти необхідних пропускнув здатностей, підтримувати якість продукту та виконувати економічні обмеження контроль за процесами сушіння стає все більш важливим [14, 15]. Термальний сушіння є енергоємною операцією, яка становить до 15% усіх промислових витрат енергії. Більше того, звичайні сушарки часто працюють з низькою тепловою ефективністю, зазвичай від 25 до 50%, але можуть бути й такі, що мають ефективність до 10%. Застосування автоматизованих технологій управління для промислових сушарок відкриває можливості для покращення роботи сушарки та її ефективності. Тому потреба в оптимальному енергетичному менеджменті, разом із запитом на високоякісні продукти, а також прийняттям більш суворих норм безпеки та екології, спонукає до розробки більш сучасних стратегій управління сушарками.

Керування з використанням автоматизованих технологій стає необхідним у харчовій промисловості завдяки численним перевагам, які надають комп'ютери, включаючи віддалений доступ, розширену функціональність і можливість збору та організації інформаційних потоків та баз даних. Ці функції є досить важливими для планування складних операцій та відстеження процесів. Керування, що забезпечується комп'ютером, у процесі сушіння є особливо важливим через нерівномірність, нестійкість і іноді значну невизначеність процесу сушіння. У багатьох випадках процес сушіння намагається досягти кількох цілей, таких як максимізація якості продукту та мінімізація витрат на виробництво, що вимагає багатовимірної оптимізації.

Автоматизований контроль може використовуватися на різних рівнях: від контролю окремих сушарок до контролю виробничих ліній. Проте виникає спектр проблем, які потрібно вирішити за допомогою комп'ютерного контролю

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Галінтовський</i>				<b>Удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						23	14
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				<b>ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО</b>			
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

з різними цілями:

Рівень апарату: контроль умов сушіння (температура, вологість, потік повітря, потік продукції) відповідно до рекомендацій щодо процесу сушіння. На цьому рівні застосовується комп'ютеризований контроль з метою підтримання або зміни умов сушіння відповідно до конкретного графіка сушіння. Однією з функцій комп'ютеризованого контролю на цьому рівні є виявлення несправностей.

Рівень процесу: на цьому рівні враховуються явища транспорту та фізико-хімічні властивості сировини. Метою є оптимізація даного процесу сушіння в термінах швидкості сушіння, споживання енергії та якості продукції. Основними інструментами для досягнення цієї мети є моделі, які забезпечують як статичну так і динамічну (траєкторну) оптимізацію. Математичні та статистичні моделі, які в основному використовувалися в минулому столітті, поступово замінюються більш передовими еволюційними, нейронними мережами та моделями нечіткої логіки [14, 15]. Принципи управління процесами залишаються все ще такими ж: зворотний зв'язок, прямий зв'язок і адаптивне управління. Інтелектуальне управління в основному є або одним із цих традиційних методів контролю або їх комбінацією.

Моніторинг процесів: комп'ютерний інструмент, що використовується для кращої накопичення знань. Поєднання датчиків, машинного навчання та системи прийняття рішень становитиме інтелектуальне комп'ютерне управління, застосоване не лише для повної автоматизації процесів, але й для оптимізації процесів з урахуванням кількох критеріїв. Контроль сушарок є однією з найменш вивчених областей управління процесами і не прогресував одночасно з покращеннями в сушінні та дизайні сушарок.

Рівень виробництва: мета цього рівня полягає в досягненні узгодженості продукції, управлінні ресурсами та повній автоматизації виробничої лінії. Тому комп'ютеризоване управління на цьому рівні в основному використовується для автоматизованої перевірки, класифікації та контролю якості. Автоматизоване управління може оптимізувати виробничу логістику, включаючи планування виробничих циклів, розклад, транспортування і так далі. Оптимізація на цьому рівні базується на мікро- та макроекономічному аналізі та часто вимагає віддаленого доступу до баз даних та інших комп'ютерних мереж.

Основні цілі системи управління сушаркою:

- підтримка бажаної якості сушених продуктів, незалежно від порушень у процесі сушки та коливань у постачанні сировини;
- максимізація пропускну здатності при оптимальній енергетичній ефективності та мінімальних витратах;
- уникнення пересушування та недостатнього сушіння, бо недостатнє сушіння може призвести до псування у випадку зерна та продуктів харчування, тоді як пересушування сировини призводить до збільшення витрат на енергію та зменшення якості сировини, оскільки ціна деяких продуктів базується на конкретному вмісті вологи, що також може викликати термічні пошкодження чутливих до тепла продуктів;

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- зменшення дефектної продукції та викидів часток;
- стабільний процес сушіння;
- оптимізація ефективності процесу сушіння.

Сушіння є, по суті, саморегулюючим процесом, і немає потреби в автоматичному управлінні, якщо немає коливань на вході, а масовий баланс і умови процесу залишаються незмінними. Однак небагато реальних процесів сушіння коли-небудь наближаються до цього ідеалу, і зміни дійсно відбуваються, що виправдовує потребу в регулюванні та контролі. Оскільки сушарка є дуже складним пристроєм для автоматизації з великою кількістю параметрів, які впливають на якість продукції, визначення системи управління для сушарки вимагає врахування багатьох процесів. До цих параметрів відносяться динаміка процесу; кількість змінних процесу, які потрібно контролювати або моніторити; обробка продукту; робочі діапазони температури, тиску, вологості; повітряні та продуктові потоки; початковий та кінцевий вміст вологи тощо.

Вимоги та характеристики будь-якої системи управління промисловими сушарками [14, 15]:

1. Точність. Вологість виходу продукту повинна бути близькою до бажаного значення.
2. Стабільність. Система не повинна коливатися в іншому випадку можуть виникати великі коливання у вмісті вологи на виході.
3. Швидкість реагування. Будь-які порушення (наприклад, зміни у вмісті вологи на вході) повинні бути швидко компенсовані контролером для забезпечення прийнятної часу відновлення після збурень та стабільності системи.
4. Стійкість. Система управління повинна мати можливість успішно працювати в широкому діапазоні умов процесу.

Схематична діаграма змінних процесу сушіння наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Схематична діаграма змінних процесу сушіння

У процесі управління змінні, які пов'язані з промисловим процесом сушіння, можна розділити на дві загальні групи:

1. Вхідні змінні, які позначають вплив зовнішнього середовища на процес сушіння.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2. Вихідні або контрольовані змінні, які позначають вплив процесу сушіння на зовнішнє середовище.

Вхідні змінні можна додатково класифікувати на змінні, що регулюються, та порушення або навантажувальні змінні. Змінні, що регулюються, можуть бути відрегульовані або вручну, або автоматично. Порушення або змінні навантаження не можуть бути відрегульовані системою керування. Найбільш поширеними порушеннями роботи сушарки є: температура навколишнього повітря, вологість навколишнього повітря, вологість сировини, склад сировини.

Виходи або контрольовані змінні можуть бути класифіковані як вимірювані вихідні змінні та невимірювані (або важкі для вимірювання) вихідні змінні. Виходи сушарки такі: вологість сушених продуктів, температура вихідного повітря, температура повітряно-продуктової суміші (для спреї-сушарок), вологість вихідного повітря, якість продукту (колір, смак, текстура, активність тощо) [14, 15, 19]. Найбільш бажаною змінною виходу процесу сушіння для контролю є вологість продукту, але її часто важко виміряти безпосередньо. Часто вологість висушеного продукту можна вивести з температури та вологості вихідного газу, проте необхідно бути обережними при застосуванні відповідних теплових та масових балансів. Більше того, оскільки вимірювання температури вихідного газу є простим, точним, надійним, дешевим і має значний вплив на швидкість сушіння, виробники сушарок використовують цю змінну як змінну виходу контролю і більшість існуючих сушарок покладається на автоматичний контроль цієї змінної. Проте, через низьку кореляцію між температурою та фактичним вмістом вологи в продукті, використання непрямого контролю (за параметрами, такими як температура та вологість) зазвичай призводить до поганого контролю процесу сушіння. Прямий контроль та онлайн-вимірювання вмісту вологи у твердих речовинах дозволять значно поліпшити управління сушаркою, забезпечивши миттєве вимірювання вмісту вологи на виході з сушарки та автоматичну компенсацію факторів, які заважають контрольній дії.

На основі вище зазначеного можна вважати, що метою будь-якого промислового процесу сушіння є отримання твердого продукту бажаної якості при мінімальних витратах і максимальному потоці, а також забезпечення їх постійності. Якість означає, що продукт відповідає низці технічних, хімічних і біологічних параметрів, кожен з яких знаходиться в установлених межах. Щоб досягти необхідних пропускових здатностей, підтримувати якість продукту та виконувати економічні обмеження контроль за процесами сушіння стає все більш важливим. Термальний сушіння є енергоємною операцією, яка становить до 15% усіх промислових витрат енергії. Більше того, звичайні сушарки часто працюють з низькою тепловою ефективністю, зазвичай від 25 до 50%. Застосування автоматизованих технологій управління для промислових сушарок відкриває можливості для покращення роботи та її ефективності. Тому потреба в оптимальному енергетичному менеджменті, разом із запитом на високоякісні продукти, спонукає до розробки більш сучасних стратегій управління сушарками.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## 2.2 Контроль температури і тиску у процесі сублімаційного сушіння

Сублімаційне сушіння пропонує дегідратовані продукти з подовженим терміном зберігання та високою якістю. Процес, що передбачає розплавлення кристалів льоду для видалення води з заморожених матеріалів. Порівняно із сировиною, яка висушена традиційними методами, дана технологія забезпечує більшу якість за дотримання правильних параметрів процесу. Різні харчові продукти, включаючи м'ясо, каву, соки, молочні продукти, гарбуз, полуницю, спеції, помідори піддаються піддані сублімаційній сушці. Сублімаційна сушка є методом видалення води з замороженого продукту, який поміщають під вакуум, що дозволяє льоду переходити безпосередньо з твердого стану в пару, минаючи рідку фазу [23]. Здатність зберігати м'яку текстуру висушених продуктів, особливо тих, що споживаються у висушеному вигляді, як, наприклад, висушене яблуко та здатність запобігати стисненню є причинами, чому цей метод настільки широко прийнятий. Він передбачає заморожування всієї доступної вологи, зменшення деградації за рахунок впливу низької температури, збереження якості та утримання твердої структури. Таким чином, під час процедур сублімаційного сушіння швидкість теплопередачі залежить від теплових властивостей сировини, таких як питома теплоємність і теплопровідність. Теплові властивості їжі враховуються під час проектування обладнання для зберігання та охолодження продуктів, а також під час оцінки часу обробки для охолодження, заморожування, нагрівання або сушіння.

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, вакуумне сублімаційне сушіння працює за умов зниженого тиску, що дозволяє видаляти вологу без підвищення температури, яке могло б погіршити якість матеріалу. Основним принципом сублімаційного сушіння є сублімація, перехід від твердого безпосередньо до газу. Так само, як і випаровування, сублімація відбувається, коли молекула отримує достатньо енергії, щоб вирватися з молекул навколо неї. Вода перетворюється з твердої речовини (лід) в газ (пару), коли молекули матимуть достатньо енергії для вирваного вибору, але умови не будуть сприятливими для утворення рідини [17, 18, 20]. Є два основних фактори, що визначають, яку фазу (тверду, рідку або газову) прийме речовина: тепло і атмосферний тиск. Щоб речовина прийняла якусь певну фазу, температура і тиск повинні бути в певному діапазоні. Без цих умов ця фаза речовини не може існувати. Типова сублімаційна машина складається складаються з чотирьох основних частин: камери сушіння, вакуумного насоса, джерела тепла та конденсатора (рис. 2.2).

Сушильна камера – хоча процес заморожування можна ініціювати всередині камер як перший крок, система повинна мати систему заморожування. Сушильна камера – це місце, де розміщений заморожений продукт. Оскільки в камері відбуваються процеси нагрівання та охолодження, камера повинна бути спроектована так, щоб бути вакуумно-щільною, а полиці всередині повинні підтримуватися на певній температурі.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Вакуумний насос – для досягнення бажаного рівня вакууму, який є нижчим за 0,61 кПа, неконденсовані гази повинні бути видалені з камери за допомогою вакуумного насоса.

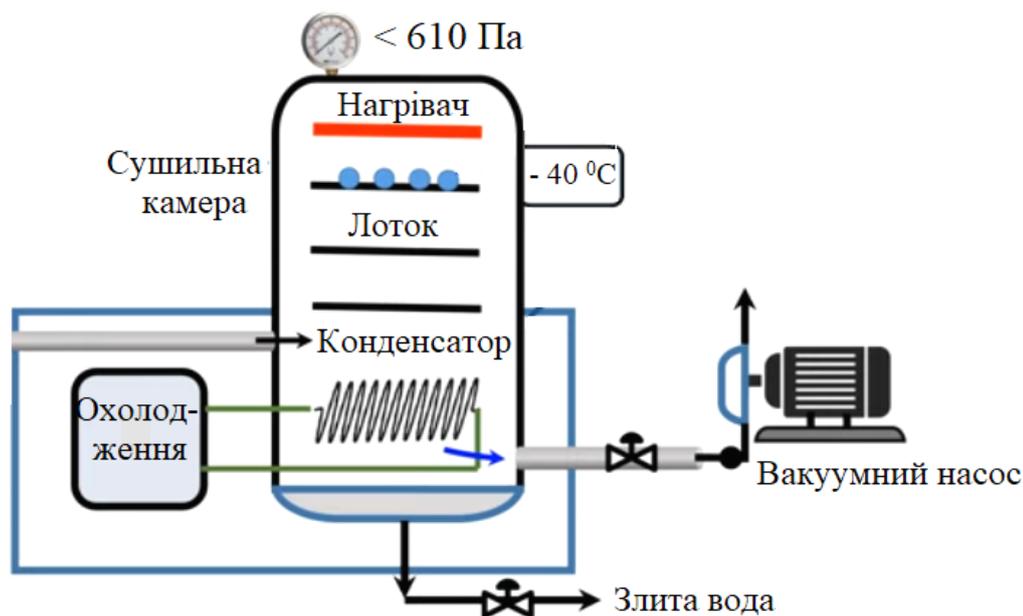


Рисунок 2.2 – Схема сублимаційної сушильної машини

Джерела тепла – температура скляного переходу та вологість продуктів харчування є двома основними факторами, що визначають температуру нагрівального джерела.

Конденсатор – завдання конденсатора полягає в зборі водяної пари, яка вивільняється під час танення льоду всередині продукту. Він повинен мати достатню площу поверхні та охолоджувальну здатність, щоб повністю конденсувати всю пару, що утворюється під час процесу сублимації. Коли водяна пара контактує з поверхнею конденсатора, вона перетворюється на кристали льоду, які вивільняють енергію перед тим, як бути виведеними з системи.

Сировини, яка підлягає сушінню розміщується полицях, коли вона ще не заморожений. Коли камера герметизується і починає процес, машина запускає компресори для зниження температури в камері. Сировина стає замороженим твердим тілом, яке відокремлює воду від усього, що його оточує, на молекулярному рівні, навіть якщо вода все ще присутня. Далі сублимаційна машина включає вакуумний насос для витіснення повітря з камери, знижуючи атмосферний тиск. Нагрівальні агрегати подають невелику кількість тепла на полиці, змушуючи лід змінювати фазу. Оскільки тиск дуже низький, лід перетворюється безпосередньо на водяну пару. Водяна пара витікає з сублимаційної сушильної камери, повз морозильний змійовик. Водяна пара конденсується на замерзаючій котушці у вигляді твердого льоду [17, 18, 20]. Так триває протягом багатьох годин при цьому сировина поступово висихає. Процес займає так багато часу, тому що перегрів матеріалу може істотно змінити склад і структуру. Крім того, прискорення процесу сублимації може виробляти більше водяної пари за певний період часу, ніж насосна система

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може видалити з камери. Це може дещо регідратувати матеріал, погіршуючи його якість. Після того, як сировина достатньо висухла її запечатують у безвологу упаковку, часто з матеріалом, що поглинає кисень. Поки упаковка надійна, матеріал може роками стояти на полиці, не розкладаючись, поки не відновиться до свого первісного вигляду за допомогою невеликої кількості води (залишається дуже невелика кількість вологи, тому матеріал з часом зіпсується).

Сублимовані продукти повинні мати певну фізичну форму. Рівномірний колір, кваліфікований залишковий вміст вологи, хороша розчинність, висока приживлюваність або ефективність, а також тривалий період зберігання. Тому необхідно не тільки контролювати сам процес, а й герметичне зберігання після сублимаційного сушіння. Що ще важливіше, так це повний контроль параметрів кожного етапу процесу сублимаційного сушіння з метою отримання високоякісної продукції. Крива сублимаційного сушіння та часова послідовність є основною основою для керування процесом сублимаційного сушіння.

Розглянемо основні параметри контролю процесу сублимаційного сушіння [16]:

1. Мінімальна температура для попереднього заморожування. Температура залежить від температури евтектичної точки продукту і мінімальна температура перед заморожуванням повинна бути нижчою, ніж температура евтектичної точки продукту. Більшість машин не можуть контролювати швидкість перед заморожуванням, тому швидкість попереднього заморожування можна визначити лише за температурою перед заморожуванням і часом пакування.

2. Час охолодження конденсатора. Конденсатор вимагає, щоб до кінця періоду заморожування саме попереднє заморожування ще не закінчилося і температура повинна почати падати перед вакуумуванням. Час на початок процесу визначається охолоджувальною здатністю конденсатора. Необхідно, щоб температура конденсатора досягала приблизно  $-40^{\circ}\text{C}$  до завершення вакуумування після попереднього заморожування. Якісний конденсатор зазвичай починає остигати за півгодини до початку процесу. Охолодження конденсатора зазвичай триває з початку до кінця процесу сублимаційної сушіння. Температура завжди повинна бути нижчою від  $-40^{\circ}\text{C}$ . Закінчення попереднього заморожування – це час роботи морозильної камери з функцією сублимаційного сушіння. Зазвичай робота морозильної камери припиняється після відкачування вакууму або досягнення заданого рівня вакууму.

3. Час вакуумування. Закінчення попереднього заморожування є моментом початку вакуумування. Під час вакуумування відкривається вакуумний клапан між конденсаторами сублимаційної камери, а вакуумний насос і вакуумний клапан також залишаються відкритими до закінчення сублимаційної сушіння.

Оскільки ступінь вакууму є надзвичайно важливим для сублимації всі нові сублимаційні сушарки оснащені пристроями вакуумної сигналізації. Час спрацьовування вакуумної сигналізації визначається з початку нагрівання до використання засобу корекції витоків або з початку використання до закінчення сушіння сублимації. Як тільки рівень вакууму падає під час процесу сублимації і

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

спрацьовує вакуумна сигналізація, з одного боку, подається сигнал тривоги, а з іншого боку, нагрівання сублімаційної сушарки автоматично відключається. Одночасно запускається морозильна камера сублімаційної сушарки для охолодження продукту, щоб захистити його від танення.

4. Час початку нагрівання. Прийнято вважати, що цей час початку нагрівання (фактично сублімація вже почалася при створенні вакууму). Нагрів починається після того, як вакуум досягає  $1 \times 10^{-4}$  мбар (приблизно  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст.). У деяких сублімаційних сушарках використовується вакуумне реле для автоматичного включення нагріву, тобто коли вакуум досягає  $1 \times 10^{-4}$  мбар, нагрівання починається автоматично; деякі сублімаційні сушарки починають нагрівання через півгодини після вакуумування, коли вакуум досягає  $1 \times 10^{-4}$  мбар або навіть вище.

5. Контроль температури. Максимально допустима температура для нагрівання продукту. Максимально допустима температура для нагрівання визначається виробом. Під час сублімації температура нагрівання може перевищувати максимально допустиму температуру продукту, оскільки продукт у цю годину все ще перебуває в стадії низької температури. Підвищення температури плити може сприяти сублімації але після сублімаційного сушіння температуру потрібно знизити, щоб вона відповідала максимально допустимій температурі продукту. За рахунок різниці температур теплопередачі температура середовища може бути трохи вищою за максимально допустиму температуру продукту. Контроль температури є важливим параметром в багатьох процесах. Використовуються спеціалізовані датчики від простих до інтелектуальних, а також застосування моніторингу навколишнього середовища для регулювання температури в сушарці.

6. Загальна година сублімаційного сушіння. Визначається загальний час, а також визначається час закінчення сублімаційного сушіння. Ця година залежить від виду продукту, способу упаковки, вантажопідйомності, продуктивності машини тощо. Як правило, година заморожування довша, близько 18-24 години, а деяким спеціальним продуктам потрібно кілька днів.

7. Контроль продукту під час сушіння. Метою будь-якого процесу сушіння є досягнення бажаних якісних характеристик (вологість, розмір, колір, текстура) сухого продукту. Завдяки моніторингу параметрів якості за допомогою розумних сенсорів (електронний ніс, електронний язик, комп'ютерний зір або спектроскопія) система контролю стає чутливою до змін якості їжі. В результаті, система контролю зможе коригувати параметри роботи відповідно до якості продукту, а загальною метою процесу сушіння буде підтримання продукту в рамках суворих стандартів якості.

Застосування комп'ютерно-оптимізованого управління в умовах сушіння є типовим для сушіння термочутливих матеріалів, таких як продукти харчування де точне контролювання умов сушіння є критично важливим для якості кінцевого продукту. Досі комп'ютерне управління було успішно застосоване в різних процесах сушіння, таких як сушіння на конвеєрних стрічках, сушіння в киплячому шарі, сублімаційне сушіння, сушіння поперечним потоком, інфрачервоне сушіння, мікрохвильове сушіння, ротаційне

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

сушіння та спреї-сушіння. Загальною метою цих застосувань є покращення точності швидких процесів сушіння.

Традиційно метою контролю в сушінні є підтримка умов навколишнього середовища якомога ближче до попередньо визначених рівнів, компенсуючи можливі відхилення. У більшості випадків цільовим виходом є остаточний вологісний вміст, а ефективність контролю визначається варіацією остаточного вологісного вмісту. Комп'ютеризований контроль може бути застосований до середовища сушіння (традиційний контроль) або до продукту під час сушіння для досягнення бажаних змін (інтелектуальний або розумний контроль). Структура універсального комп'ютеризованого контролю, що використовує два зворотних зв'язки між процесом та продуктом наведена на рисунку 2.3.

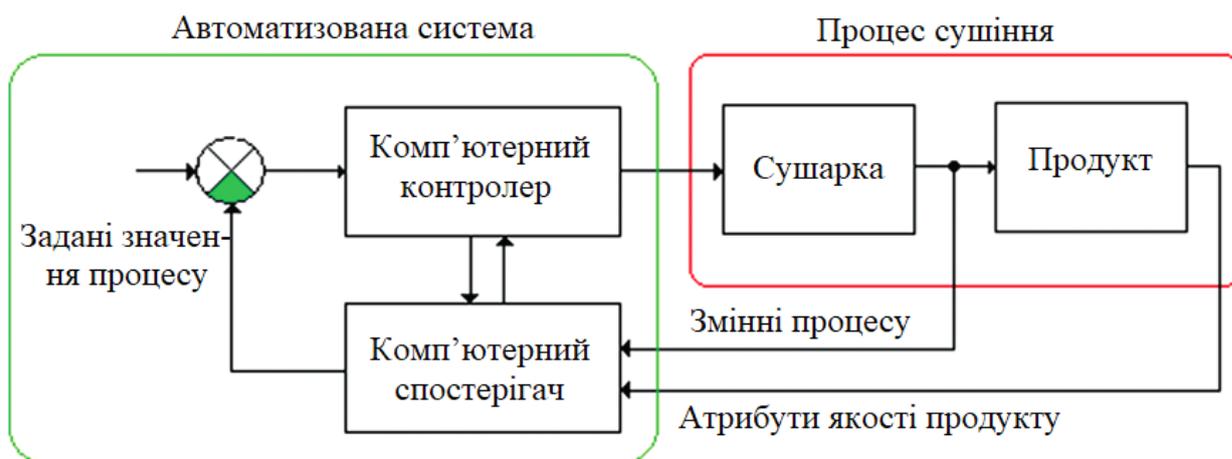


Рисунок 2.2 – Структура інтелектуального управління спрямована на якість продукції

Комп'ютерний зір у реальному часі як інтелектуальний спостерігач робить його відмінним інструментом для зворотного зв'язку в контролі сушіння. Усі застосування комп'ютерного зору можуть бути розділені на дві категорії залежно від того, чи була інформація отримана з аналізу окремих зображень або з вивчення змін у послідовних зображеннях. Приклади інформації з окремих зображень включають морфологічні характеристики (розмір, форма, площа поверхні, округлість тощо), колір і текстуру [15, 21, 22]. Це більше стосується продуктів атрибутів і може бути отримано шляхом морфологічної та кольорової обробки зображень, а також дає можливість використання зображень часових рядів для виявлення критичних контрольних точок у деградації якості. Концепція відкрила двері для впровадження різних стратегій контролю, наприклад, багатоступеневого контролю температури повітря з урахуванням вмісту вологи, усадки, температури поверхні продукту або навіть динамічної оптимізації процесу сушіння з урахуванням якості.

Упровадження ефективної та оптимізованої стратегії сушіння на основі засобів автоматизації можуть заощаджувати до 30% енергії порівняно з традиційною контрольованою системою. Концепція контрольованого процесу сушіння заснована на контролюванні температури, відносної вологості та повітряного потоку, що використовуються у процесі сушіння відносно

оброблюваного продукту, підвищує термодинамічну ефективність процесу та зберігає максимальну якість продукту [14, 15]. Контроль температури та тиску є важливими параметрами у процесі сублімаційного сушіння. Тому використання спеціалізованих датчиків від простих до інтелектуальних, а також застосування моніторингу навколишнього середовища для регулювання температури в сушарці є необхідним для покращення виробничого процесу.

### **2.3 Модифікація сушильного обладнання на основі засобів автоматизації**

Сушіння є одним із найширше використовуваних методів збереження сировини. Іншою метою сушіння є зменшення вмісту води для мінімізації мікробного псування та потенціалу погіршення під час зберігання. Сушіння також призводить до втрати ваги, що полегшує транспортування висушеного продукту та подовжує термін зберігання. Серед інших переваг сушіння – надійність та ефективна форма збереження сировини. Сушіння може бути прямим і непрямим у процесі видалення вологи із харчової продукції, що зменшує деградацію, спричинену вологістю. Часто з продуктами харчування, через зв'язок між температурою та вологістю більшість сільськогосподарських продуктів є термо-чутливими, а їх колір, хімічні та фізичні властивості можуть значно змінюватися через надмірне накопичення тепла під час сушіння. Через важливість збереження якості кінцевого продукту, покращення ефективності процесу переробки їжі та зменшення відходів під час процесу сушіння автоматичний контроль процесу сушіння є важливим. Тому використання спеціалізованих датчиків від простих до інтелектуальних, а також застосування моніторингу навколишнього середовища для регулювання температури в сушарці є необхідним для покращення виробничого процесу.

Датчики – це механічні або електронні пристрої, модулі або підсистеми, призначені для вимірювання змін у навколишньому середовищі та передачі інформації на контролер або комп'ютер. Датчики зазвичай нагадують людські відчуття, такі як зір, слух, нюх, дотик, смак проте вони значно перевершують людську чутливість у плані числової та повторювальної оцінки змінних навколишнього середовища, таких як температура, вологість, швидкість повітря та інше. Щоб відобразити фізичні зміни в навколишньому середовищі, датчики використовують різні фізичні ефекти [15]. Критичними характеристиками хорошого сенсора є чутливість (він чутливий до вимірюваної властивості), селективність (нечутливий до будь-якої іншої властивості, яка ймовірно зустрінеться у його застосуванні) та не впливає на вимірювану властивість. Крім цього, вибір сенсора визначається його надійністю, терміном служби, розмірами, інерцією, виходом (аналоговий чи цифровий), точністю, лінійністю, зсувом, діапазоном вимірювань, вартістю тощо.

Хімічні датчики та біосенсори становлять особливий клас датчиків, що забезпечують інформацію про хімічний склад навколишнього середовища. Такі датчики використовують клітини, білки, нуклеїнові кислоти або біоміметичні полімери як основні чутливі елементи. Їхня реакція перетворюється на

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

електричний сигнал за допомогою перетворювача (зазвичай напівпровідника). М'які (або програмні) датчики є, по суті, віртуальними датчиками, які поєднують нелінійні (іноді також не вибірккові) фізичні датчики з математичними моделями для лінійної трансформації та подальшого використання в спостерігачах системи. Математична модель і злиття датчиків (якщо це необхідно) вважаються ключовими елементами м'якого датчика.

Процес сушіння може бути партійним або безперервним, концентрованим або розподіленим. Кожен випадок вимагає ретельного вибору датчиків і приладів для спостерігача системи. Традиційний процес сушіння заснований лише на методах спостереження та контролю таких змінних (температура, вологість, швидкість повітря) без урахування якості продукту. На відміну від цього, сучасні технології сушіння засновані на якості сушіння, як одного з основних пріоритетів [14, 15]. Нова генерація розумних технологій сушіння вимагає обладнання для спостереження за показниками якості продукту (вологість, усадка, колір, текстура, фізико-хімічні властивості тощо) та їх змінами, спричиненими певною комбінацією факторів сушіння. Цей особливий клас сенсорів та обладнання, що відображає ключові показники якості продукту та їх зміни під час сушіння, включає біоміметичні сенсори (електронний ніс, електронний язик), комп'ютерне зір і спектроскопію. Комп'ютерне зір і біоміметичні сенсори надають інформацію про показники якості, сприймані споживачем, тоді як спектроскопія в основному відображає харчову цінність продукту.

Біоміметичні датчики – це сенсори вимірюють запах і смак, які впливають на сприйняття якості та ринкової вартості харчового продукту споживачами. Моніторинг аромату є критично важливим для численних операцій із продуктами харчування, таких як сортування, сушіння, упаковка та зберігання. У поєднанні з комп'ютерним програмним забезпеченням та аналізом даних ці сенсорні системи забезпечують економічно ефективні рішення в реальному часі для контролю та оптимізації процесів. Вони замінюють дорогі аналітичні аналізи при складному аналізі якості та автентичності продуктів харчування. Е-носи зазвичай складаються з масиву напівпровідників на основі металевих оксидів, вибірково чутливих до певної групи ароматичних компонентів. Інформація про концентрацію ароматичних компонентів у сушильній камері використовувалася для контролю процесу мікрохвильового сушіння. Хоча біоміметичні сенсори не є ідеально вибіркковими та міцними, кількість їх застосувань у сушінні продовжує зростати.

Розвиток автоматизованих систем управління сушінням сприяв вивченню фізичних принципів, що беруть участь у процесах сушіння, що сприяє використанню автоматизованого контролю сушіння. Більш ефективні системи сушіння можуть бути досягнуті через штучні інтелектуальні контролі температури та повітряного потоку, використаного під час сушіння [21, 22]. Система може надати такі переваги, як швидке отримання даних під час складних експериментальних умов у сушінні, точне таймування та спрацьовування одночасних і послідовних подій, автоматичний контроль численних пристроїв або операцій, універсальність дії через програмний

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контроль та легкість підключення до різноманітних комп'ютерних терміналів і систем цифрового запису для моніторингу процесів і контролю процесів сушіння.

Щоб підвищити ефективність, важливо розуміти етапи сублімаційного сушіння: заморожування, первинне сушіння (сублімація) та вторинне сушіння (десорбція). Заморожування є початковим етапом у процесі сублімаційного сушіння. Розмір і форма кристалів льоду залежать від швидкості заморожування. Повільна швидкість заморожування призводить до утворення більших кристалів і навпаки. В результаті розмір кристалів впливає на швидкість сушіння, бо чим більші кристали льоду легше сублімуються і, отже, прискорюють первинне сушіння.

Основним етапом сушіння є стадія сублімації, яка полягає в застосуванні вакууму та підвищенні температури. Щоб розпочати сублімацію температура продукту має бути на 2-3<sup>0</sup> градусів нижче температури руйнування. Температура руйнування – це точка, вище якої продукт ризикує втратити свою макроскопічну структуру під час процесу сублімаційного сушіння [23]. Вторинне сушіння або етап адсорбції. Вторинне сушіння, повільний етап процесу льодяної сушки, який може зайняти щонайменше на 30% більше часу для завершення, ніж завершення сублімації, починається під час того, як ще відбувається сублімація. Цей кінцевий етап може проводитися при вищій температурі але нижче температури скляного переходу сухих матеріалів, щоб ефективніше видалити залишкову не заморожену або зв'язану воду шляхом десорбції. 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. Враховуючи особливості етапів сублімаційного сушіння можна вважати, що необхідно дотримуватися наступні вимог у процесі сушіння:

- швидке заморожування для утворення дрібних кристалів льоду для легшої сублімації;
- контрольоване підвищення температури зберігання при первинному сушінні;
- тривала вторинна сушка тільки в тому випадку, якщо залишкова вологість висока.

Кожен етап вимагає точного контролю температури і тиску. Наприклад, при первинному сушінні температура зберігання повинна бути досить високою для сублімації льоду, але досить низькою, щоб уникнути танення або руйнування продукту. Контроль температури та тиску є важливими параметрами у процесі сублімаційного сушіння. Тому використання спеціалізованих датчиків від простих до інтелектуальних, а також застосування моніторингу навколишнього середовища для регулювання температури в сушарці є необхідним для покращення виробничого процесу (рис. 2.4).

Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик вологості всередині сушильної камери, що дозволяє визначити кінцеву точку первинного сушіння, запобігаючи пересушуванню або недосушуванню. Така точність

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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.

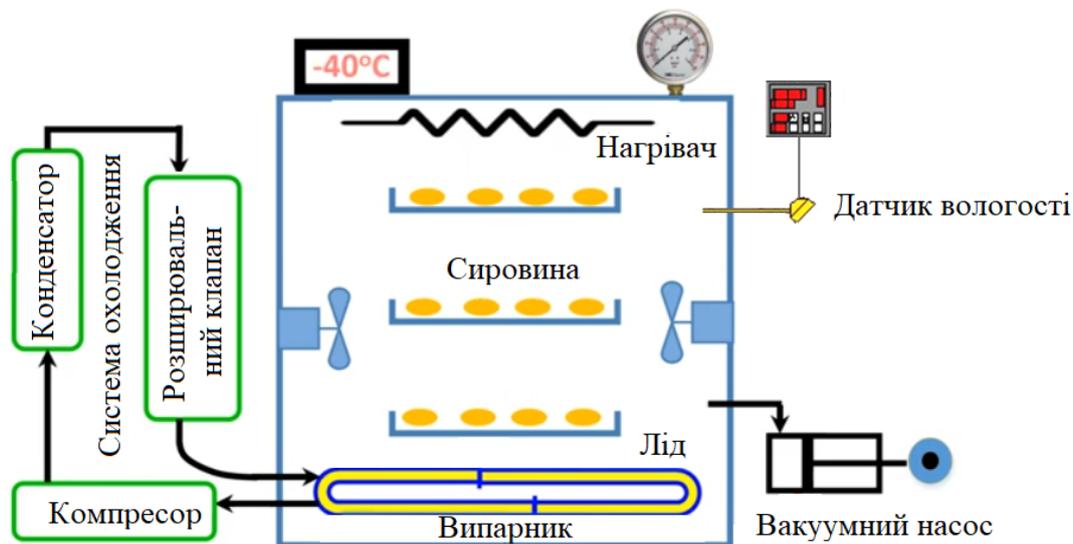


Рисунок 2.4 – Модифікація сушильного обладнання на основі засобів автоматизації (вбудований датчик вологості для визначення кінцевої точки первинного сушіння)

На основі вище зазначеного можна вважати, що метою будь-якого промислового процесу сушіння є отримання твердого продукту бажаної якості при мінімальних витратах і максимальному потоці, а також забезпечення їх постійності. Термальний сушіння є енергоємною операцією, яка становить до 15% усіх промислових витрат енергії. Більше того, звичайні сушарки часто працюють з низькою тепловою ефективністю, зазвичай від 25 до 50%. Застосування автоматизованих технологій управління для промислових сушарок відкриває можливості для покращення роботи та її ефективності.

Зазначено, що упровадження ефективної та оптимізованої стратегії сушіння на основі засобів автоматизації можуть заощаджувати до 30% енергії порівняно з традиційною контрольованою системою. Концепція контрольованого процесу сушіння заснована на контролюванні температури, відносної вологості та повітряного потоку, що використовуються у процесі сушіння відносно оброблюваного продукту, підвищує термодинамічну ефективність процесу та зберігає максимальну якість продукту.

В роботі запропоновано удосконалення сублімаційної сушарки на основі засобів автоматизації, бо 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, вакуумне сублімаційне сушіння працює за умов зниженого тиску, що дозволяє видаляти вологу без підвищення температури, яке могло б погіршити якість матеріалу. Основним принципом сублімаційного сушіння є сублімація, перехід від твердого безпосередньо до газу. Так само, як і

випаровування, сублімація відбувається, коли молекула отримує достатньо енергії, щоб вирватися з молекул навколо неї. Вода перетвориться з твердої речовини (лід) в газ (пару), коли молекули матимуть достатньо енергії для вирваного вибору, але умови не будуть сприятливими для утворення рідини.

Розглянуто етапи сублімаційного сушіння: заморожування, первинне сушіння (сублімація) та вторинне сушіння (десорбція). Заморожування є початковим етапом у процесі сублімаційного сушіння. Розмір і форма кристалів льоду залежать від швидкості заморожування. Повільна швидкість заморожування призводить до утворення більших кристалів і навпаки. В результаті розмір кристалів впливає на швидкість сушіння, бо чим більші кристали льоду легше сублімуються і, отже, прискорюють первинне сушіння.

Основним етапом сушіння є стадія сублімації, яка полягає в застосуванні вакууму та підвищенні температури. Щоб розпочати сублімацію температура продукту має бути на 2-3<sup>0</sup> градусів нижче температури руйнування. Температура руйнування – це точка, вище якої продукт ризикує втратити свою макроскопічну структуру під час процесу сублімаційного сушіння. Вторинне сушіння або етап адсорбції. Вторинне сушіння, повільний етап процесу льодяної сушки, який може зайняти щонайменше на 30% більше часу для завершення, ніж завершення сублімації, починається під час того, як ще відбувається сублімація.

Сконцентровано увагу на тому, що 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.

Враховуючи особливості етапів сублімаційного сушіння можна вважати, що необхідно дотримуватися наступні вимог у процесі сушіння: швидке заморожування для утворення дрібних кристалів льоду для легшої сублімації; контрольоване підвищення температури зберігання при первинному сушінні; тривала вторинна сушка тільки в тому випадку, якщо залишкова вологість висока.

Кожен етап вимагає точного контролю температури і тиску. Наприклад, при первинному сушінні температура зберігання повинна бути досить високою для сублімації льоду, але досить низькою, щоб уникнути танення або руйнування продукту. Контроль температури та тиску є важливими параметрами у процесі сублімаційного сушіння. Тому використання спеціалізованих датчиків від простих до інтелектуальних, а також застосування моніторингу навколишнього середовища для регулювання температури в сушарці є необхідним для покращення виробничого процесу.

Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик вологості всередині сушильної камери, що дозволяє визначити кінцеву точку первинного сушіння, запобігаючи пересушуванню або недосушуванню. Така точність первинної фази сушіння не лише скоротить час циклу та забезпечить стабільну якість продукції, а й безпосередньо впливатиме на тривалість вторинної фази сушіння, бо якщо залишкова вологість першої фази буде високою – це вплине на другу фазу сушіння, яка триватиме довше ніж потрібно для отримання якісної сировини.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

## РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Параметри, що впливають на процес сублімаційного сушіння

Сублімаційне сушіння використовувався для обробки різноманітних харчових продуктів, включаючи полуницю, яблука, помідори, спаржу та гарбузи. Проте зміни, що відбуваються під час обробки, впливають на фізико-хімічні та структурні зміни в сировині. Важливими питаннями, які виникають під час обробки та зберігання продуктів харчування є зміни кольору та нестача стабільності кольору. Технології обробки впливають на пористість, текстуру, смак, збереження поживних речовин та сорбцію компонентів. Фізичні, хімічні та харчові характеристики продуктів значно змінюються в процесі сушіння проте сублімаційне сушіння є менш шкідливим, ніж сушіння повітрям та розпилювальне сушіння. Щоб виробити продукт, що підлягає заморожуванню, достатньої якості, необхідно регулювати швидкість заморожування, рівень температури, загальний газовий тиск і остаточний середній вміст вологи.

1. Структура сировини, що підлягає сублімаційному сушінню впливає на швидкість сублімації. Деякі матеріали можуть містити інгредієнти, які сублімуються повільніше, ніж інші, що впливає на загальну тривалість процесу. Також більші або складніші форми сировини можуть вимагати більше часу для рівномірного завершення процесу сублімації.

2. Температура нагрівальної пластини. Параметри процесу заморожування-висушування можуть мати значний вплив на низку якісних характеристик продуктів харчування, які підлягають цьому методу дегідратації. Температура нагрівальної пластини є одним з елементів, які є критично важливими для розвитку структури матеріалу під час процесу заморожування-висушування. Виконання операції при неправильній температурі може призвести до небажаних змін у структурі сировини. Широке руйнування структури під час вторинного висушування може знизити швидкість заморожування-висушування та погіршити багато властивостей продукту, включаючи текстуру, пористість, об'єм, форму, липкість, спроможність і стабільність [23, 25-27]. Первинні та вторинні етапи сублімаційного сушіння мають різні механізми сушіння. Найдовший етап сушіння – це сублімація льоду, яка вимагає більше енергії, ніж наступний етап сушіння. З цієї причини було проведено значну роботу з розробки відповідних циклів сублімаційного сушіння, зокрема первинного сушіння для різних харчових продуктів. Вищі температури сублімаційного сушіння на вторинному етапі повинні прискорити процес сушіння, оскільки для видалення надлишкової води із сировини потрібно більше енергії. Однак температура, що занадто висока, може призвести до усадки або танення льоду під час етапу сублімації сушіння. При

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Галінтовський</i>			<b>Удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					37	6
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>				<b>ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО</b>		
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

виборі відповідної температури полиці слід враховувати баланс між вхідними даними та необхідним теплом при проектуванні процесу сублімаційної сушіння якості кінцевого продукту є важливим фактором.

Фізичні характеристики сировини включають такі аспекти, як форма, об'єм, колір та текстура, які особливо важливі для споживачів. Ключовим критерієм для оцінки якості продукту, що сушиться методом заморожування є його пористість. Текстура продуктів, зокрема їхня хрусткість та хрумкість значною мірою залежить від розміру та розподілу пор в матеріалі. Коли температура пластини підвищується для сублімованих фруктів, очевидна пористість зростає. Усі сушені продукти не можна включити в ідею скляного переходу, яка стверджує, що основні зміни в очевидній пористості (зменшення утворення пор) та руйнування структури. Сировина може відрізнятися за своєю структурою, складом, початковою пористістю матеріалів, сортом, стиглістю, розміром, формою, попередньою обробкою перед сушінням та умовами процесу, що може вплинути на механізм утворення пор і зменшення під час сушіння [23]. Через наявність повітряних проміжків і пор, пориста структура висушених матеріалів може впливати на колірні дескриптори, зокрема на світлість матеріалу. Визначення кольорових параметрів висушеного продукту є важливим, оскільки колір продукту є одним з основних критеріїв якості, які враховують споживачі. Ненавмисне теплове руйнування кількох корисних хімічних сполук можна виявити за змінами кольору висушених продуктів.

3. Тиск у камері сублімаційного сушіння. Тиск у камері сублімаційного сушіння контролюється та регулюється для полегшення сублімації замороженої води. Нижній тиск зазвичай прискорює процес, але його необхідно контролювати, щоб уникнути пошкодження виробу. Тиск може мати істотний вплив як на хід процесу, так і на якість кінцевих продуктів, зокрема на характеристики кольору. Значення яскравості  $L^*$  зростає при низькому тиску, тоді як значення хроматичності  $C^*$  зменшується. При більшому робочому тиску можна отримати темніші та більш насичені кольори сушеної сировини. Процес сублімації, зокрема температура сублімації льоду, сильно залежить від тиску. Лід сублімується, залишаючи пори та щілини з різними властивостями. Тому, регулюючи параметри в замороженому висушуванні, можна досягти бажаної пористості, щільності та кінцевого вмісту води. Текстура сухих продуктів може бути описана за допомогою структурних характеристик, таких як щільність і пористість. Крім того, можна налаштувати процес сушіння та впливати на багато різних аспектів, таких як текстурні характеристики їжі, контролюючи, як утворюються та розподіляються пори в продуктах під час сушіння.

4. Температура замерзання. Температура при якій продукт заморожується, може вплинути на швидкість сублімації. Чим нижча температура замерзання, тим швидше відбувається сублімація, але це також може вплинути на якість кінцевого результату. Тому іншим важливим етапом є заморожування сировини перед сублімацією. На структуру як сушених так і заморожених матеріалів впливає швидкість заморожування. Початкова структура і склад сировини можуть впливати на якості заморожених продуктів. Текстура, ступінь зрілості та вміст вологи в рослинних тканинах значно впливають на процес сублімаційного сушіння.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Час, температуру та тиск є найважливіші параметри в процесі сублімації. Якщо ці параметри правильно визначені, вони можуть впливати на якість кінцевого продукту. Тому необхідно зберігати сублімовані продукти в герметичному контейнері. Продукти харчування, які були заморожені в сушарці, потрібно упакувати в герметичні контейнери, щоб запобігти витоку кисню та вологи. Для продуктів харчування, що піддалися замороженому сушінню, також підходять вакуумна упаковка та упаковка в інертному газі, щоб запобігти окисленню продуктів харчування.

### 3.2 Дослідження сублімаційного процесу сушіння полуниці та бананів

Багато з якісних характеристик продуктів харчування, які підлягають такому типу дегідратації, можуть коливатися під впливом параметрів процесу заморожування-висушування. Один з факторів, який є вирішальним у формуванні структури матеріалу під час процесу заморожування-висушування є температура нагрівальної пластини. Використання невідповідної температури під час процесу може призвести до небажаних змін у структурі сировини. Надмірне руйнування структури може погіршити багато характеристик продукту, таких як текстура, пористість, об'єм, форма та здатність до регідратації та стабільність. Фізичні характеристики сировини включають такі аспекти, як форма, об'єм, колір та текстура, які особливо важливі для споживачів. Проте ключовим критерієм для оцінки якості продукту, що сушиться методом заморожування є його якісні показники.

У роботі було досліджено процес сублімаційного сушіння полуниці та бананів. Структура сировини, що підлягає сублімаційному сушінню впливає на швидкість сублімації. Деякі матеріали можуть містити інгредієнти, які сублімуються повільніше, ніж інші, що впливає на загальну тривалість процесу. Також більші або складніші форми сировини можуть вимагати більше часу для рівномірного завершення процесу сублімації. Зразки підлягали сушінню в сублімаційній сушарці (рис. 3.1).



Технічні характеристики
Площа полиць – 0.2 м <sup>2</sup>
Робоча глибина вакууму – 15-112 Па
Температура на поверхні субліматора – - 40°C
Температура полиць – + 60°C
Час технологічного циклу – 24-48 годин
Встановлена потужність всіх пристроїв і агрегатів – 1.2 кВт/год
Маса не більше – 70 кг

Рисунок 3.1 – Сублімаційна сушарка [28]

Для термочутливих матеріалів температура повинна обмежуватися в межах 10-35°C, а для менш термочутливих матеріалів температура може бути вищою за 50°C, щоб контролювати стабільність продукту, особливо під час стадії вторинного сушіння. Вищі температури на вторинній стадії повинні прискорити процес сушіння, оскільки потрібна більша енергія для видалення надлишкової води з матеріалу. Однак температура, яка занадто висока, може призвести до зменшення обсягу або танення льоду під час стадії сублімації сушіння. Баланс між подачею та необхідним теплом слід враховувати під час вибору відповідної температури полиці.

*Фаза 1 дослідження:* фаза заморожування. Заморожування є першим критичним кроком у процесі сублімаційного сушіння, який закладає основу для ефективної сублімації. Він передбачає зниження температури сировини значно нижче точки його замерзання, щоб забезпечити повне застигання. Цей етап є ключовим, оскільки утворення кристалів льоду безпосередньо впливає на наступні фази сушіння, впливаючи на якість і стабільність кінцевого продукту.

Зниження температури: матеріал охолоджується значно нижче точки замерзання, часто використовуючи спеціалізовані морозильники або криогенні рідини. Це необхідно для того, щоб вся вода, що міститься в матеріалі, повністю затверділа в лід. Утворення кристалів льоду: швидкість і спосіб заморожування впливають на розмір і структуру кристалів льоду, що утворюються [25-27]. Повільне заморожування має тенденцію виробляти більші кристали, що є кращим для деяких матеріалів, оскільки це може сприяти легшій сублімації пізніше. Стабілізація: забезпечення того, щоб сировина досягла рівномірно замороженого стану. Має вирішальне значення для стабільного сушіння на наступних етапах. Ця стабільність є ключовою до збереження структурної цілісності матеріалу.

*Фаза 2 дослідження:* первинне сушіння (сублімація). Під час фази первинного сушіння сублімаційна сушарка знижує тиск і обережно подає тепло, дозволяючи захопленій воді у вигляді льоду сублімуватися. Управління температурою та тиском сублімаційного сушіння є життєво важливим для запобігання структурним пошкодженням, максимізуючи видалення води. Цей етап методичний і повільний, спрямований на збереження біологічної та хімічної цілісності матеріалу.

1. Зниження тиску: до камери, що містить заморожений матеріал, подається вакуум. Зниження тиску знижує точку сублімації льоду, полегшуючи його перехід з твердого стану в газовий без проходження рідкої фази.

2. Контрольований нагрів: тепло обережно застосовується до матеріалу, щоб забезпечити енергію, необхідну для сублімації. Нагрівання необхідно контролювати, щоб уникнути пошкодження структури матеріалу, що може статися, якщо температура піднімається занадто високо і занадто швидко.

3. Видалення водяної пари: коли лід сублімується, утворена водяна пара відтягується від матеріалу та захоплюється холодним конденсатором, запобігаючи повторній конденсації та зберігаючи ефективність вакууму.

Щоб процес сублімації протікав, повинні бути дотримані дві основні умови: піднесена пара повинна постійно видалятися із зони сублімації, а для підтримки перепаду тиску пари, що призводить до видалення водяної пари з

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

камери, необхідно безперервно подавати на матеріал тепло, необхідне для сублімації. Якщо будь-яка з цих двох основних умов не виконується, виникають деякі несприятливі явища, такі як розм'якшення, відтавання, випинання або руйнування структури [24]. Потік тепла, що подається залежить від способу нагріву. У разі контактного нагріву необхідно встановити відповідну температуру на полиці. Зразки полуниці (свіжої та сублімованої після другої фази сушіння, а саме сублімації) наведені на рисунку 3.2.



Свіжа полуниця

Сублімована полуниця

Рисунок 3.2 – Зразки полуниці

*Фаза 3 дослідження:* вторинне сушіння (адсорбція). Останньою перешкодою в сублімаційному сушінні є вторинна фаза сушіння, коли зв'язані молекули води видаляються шляхом адсорбції. Тут температуру трохи підвищують, щоб розірвати молекулярні зв'язки, домагаючись сухого стану з мінімальним вмістом вологи. Цей етап забезпечує довгострокову стабільність і якість висушеного продукту, що робить сублімаційне сушіння безцінним методом у багатьох сферах [25-27].

1. Підвищена температура: після того, як більша частина води була видалена шляхом сублімації, температуру трохи підвищують, щоб розірвати будь-які фізичні або хімічні зв'язки води в матеріалі, що залишилися.

2. Десорбція: цей етап передбачає видалення молекул води, які більш тісно пов'язані в молекулярній структурі матеріалу, яка не сублімувалася під час первинної фази сушіння.

3. Зменшення вологості: мета полягає в тому, щоб зменшити вміст вологи до дуже низького рівня, як правило, від 1% до 4%, забезпечуючи стабільність і довговічність сировини при зберіганні при кімнатній температурі.

Зразки полуниці та бананів підлягали сублімаційному сушінню у встановленому діапазоні температур від 30 до 60 градусів на полицях. Результати свідчать, що усадка полуниці суттєво не відрізнялася при різних температурах. У випадку банана більш висока температура, а саме 60 градусів викликала максимальну усадку зразка на 10%, однак при нижчих температурах цей показник знизився приблизно до 6%. При нижчих температурах нагріву 30 і 40 градусів не було помітних відмінностей в кольорових характеристиках полуниці та банана.

Зразки банану (сублімований та висушений банан після третьої фази сушіння) наведені на рисунку 3.3.



Сублімований банан



Сушений банан

Рисунок 3.3 – Зразки банану

Зразків полуниці при різних температурах у діапазоні від 30 до 60 градусів не суттєво відрізнявся у зменшенні об'єму. Хоча кількість більш висушених зразків зростала зі збільшенням температури нагрівання, значення зменшення об'єму фруктів залишалось незалежним від температури. У випадку бананів більш висока температура спричинила зменшення зразка максимум на 10%. Однак при нижчих температурах цей показник зменшувався до приблизно 6%. Відповідно в умовах однакового сублімаційного сушіння полуниця є менш схильною до знебарвлення порівняно з бананом. Колір і об'єм сублімаційно висушеної полуниці не піддавалися змінам під час підвищення температури полиць на відміну від банану.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сублімаційне сушіння використовувався для обробки різноманітних харчових продуктів, включаючи полуницю, яблука, помідори, спаржу та гарбузи. Проте зміни, що відбуваються під час обробки, впливають на фізико-хімічні та структурні зміни в сировині. Фізичні характеристики сировини включають такі аспекти, як форма, об'єм, колір та текстура, які особливо важливі для споживачів. Проте ключовим критерієм для оцінки якості продукту, що сушиться методом заморожування є його якісні показники.

У роботі було досліджено процес сублімаційного сушіння полуниці та бананів. Структура сировини, що підлягає сублімаційному сушінню впливає на швидкість сублімації. Деякі матеріали можуть містити інгредієнти, які сублімуються повільніше, ніж інші, що впливає на загальну тривалість процесу. Результати свідчать, що полуниця та банани, які підлягали сублімаційному сушінню у встановленому діапазоні температур від 30 до 60 градусів на полицях мали різку усадку та об'єм. Проте при нижчих температурах нагріву 30 і 40 градусів не було помітних відмінностей в кольорових характеристиках полуниці та банана. В умовах однакового сублімаційного сушіння полуниця є менш схильною до знебарвлення порівняно з бананом. Колір і об'єм сублімаційно висушеної полуниці не піддавалися змінам під час підвищення температури полиць на відміну від банану.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена удосконаленню технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації. У роботі зазначено, що метою будь-якого процесу сушіння є отримання твердого продукту бажаної якості при мінімальних витратах і максимальному потоці, а також забезпечення їх постійності. Якість означає, що продукт відповідає низці технічних, хімічних і біологічних параметрів, кожен з яких знаходиться в установлених межах. Тому щоб досягти необхідних пропускнув здатностей, підтримувати якість сировини та виконувати економічні обмеження контроль за процесами сушіння стає все більш важливим.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для сушіння рослинної сировини. Зазначено, що одним із факторів, що впливають на якість рослинної сировини є стабілізація яка переважно пов'язана з процесом сушіння, який слід проводити в умовах, що не знижують якості сировини, а температуру та час сушіння слід адаптувати до конкретних матеріалів. Процеси сушіння можна класифікувати відповідно до методу видалення води на осмотичне зневоднення, механічне осушення та термічне сушіння. У процесах осмотичного зневоднення застосовують розчин для видалення води, тоді як у механічному осушенні необхідне використання фізичної сили.

Зазначено, що сушильне обладнання можна поділити за різними критеріями, наприклад, враховуючи механізм сушіння: конвективні сушарки (волога з матеріалу зменшується за допомогою потоку сушильного газу) та контактні сушарки (матеріал контактує з гарячою поверхнею циліндричних камер). Досягнення економічно обґрунтованої кінетики сушіння насамперед визначає мету сушіння, знання фізичних та хімічних характеристик сушеної сировини і його кількості, а також правильний вибір типу сушарки та деталей її конструкції. Існує багато різних типів і варіацій сушарок і вибір правильної сушарки є важливим для досягнення бажаних результатів.

Сконцентровано увагу на тому, що сушіння є енергоємним процесом і наразі витрачає приблизно чверть світового виробництва енергії, що є значним фактором в економіці виробництва. Розглянуто споживання енергії різними сушарками задля оцінки споживання енергії для деяких поширених типів сушарок, таких як: мікрохвильові сушарки, інфрачервоні сушарки з вакуумним насосом, сонячні сушарки та гібридні сушарки. Ці сушарки споживають різні кількості енергії в залежності від типу культури, що сушиться, та бажаного рівня вологості на виході.

Другий розділ присвячено удосконаленню сублимаційної сушарки засобами автоматизації. Зазначено, що упровадження ефективною та оптимізованою стратегією сушіння на основі засобів автоматизації можуть заощаджувати до 30% енергії порівняно з традиційною контрольованою

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Галінтовський</i>			<b>Удосконалення технології та обладнання для сушіння рослинної сировини на основі засобів автоматизації</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					43	6
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>				<b>ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО</b>		
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

системою. Концепція контрольованого процесу сушіння заснована на контролюванні температури, відносної вологості та повітряного потоку, що використовуються у процесі сушіння відносно оброблюваного продукту, підвищує термодинамічну ефективність процесу та зберігає максимальну якість продукту.

В роботі запропоновано удосконалення сублімаційної сушарки на основі засобів автоматизації. Розглянуто етапи сублімаційного сушіння: заморожування, первинне сушіння (сублімація) та вторинне сушіння (десорбція). Враховуючи особливості етапів сублімаційного сушіння можна вважати, що необхідно дотримуватися наступні вимог у процесі сушіння: швидке заморожування для утворення дрібних кристалів льоду для легшої сублімації; контрольоване підвищення температури зберігання при первинному сушінні; тривала вторинна сушка тільки в тому випадку, якщо залишкова вологість висока.

Сконцентровано увагу на тому, що кожен етап вимагає точного контролю температури і тиску. Наприклад, при первинному сушінні температура зберігання повинна бути досить високою для сублімації льоду, але досить низькою, щоб уникнути танення або руйнування продукту. Контроль температури та тиску є важливими параметрами у процесі сублімаційного сушіння. Тому використання спеціалізованих датчиків від простих до інтелектуальних, а також застосування моніторингу навколишнього середовища для регулювання температури в сушарці є необхідним для покращення виробничого процесу.

Вважається за доцільне застосовувати вбудований датчик вологості всередині сушильної камери, що дозволяє визначити кінцеву точку первинного сушіння, запобігаючи пересушуванню або недосушуванню. Така точність первинної фази сушіння не лише скоротить час циклу та забезпечить стабільну якість продукції, а й безпосередньо впливатиме на тривалість вторинної фази сушіння, бо якщо залишкова вологість першої фази буде високою – це вплине на другу фазу сушіння, яка триватиме довше ніж потрібно для отримання якісної сировини.

У третьому розділі зазначено, що сублімаційне сушіння використовувався для обробки різноманітних харчових продуктів, включаючи полуницю, яблука, помідори, спаржу. Проте зміни, що відбуваються під час обробки, впливають на фізико-хімічні та структурні зміни в сировині. Деякі матеріали можуть містити інгредієнти, які сублімуються повільніше, ніж інші, що впливає на загальну тривалість процесу.

Досліджено процес сублімаційного сушіння полуниці та бананів. Результати свідчать, що полуниця та банани, які підлягали сублімаційному сушінню у встановленому діапазоні температур від 30 до 60 градусів на полицях мали різку усадку та об'єм. Проте при нижчих температурах нагріву 30 і 40 градусів не було помітних відмінностей в кольорових характеристиках полуниці та банана. В умовах однакового сублімаційного сушіння полуниця є менш схильною до знебарвлення порівняно з бананом. Колір і об'єм сублімаційно висушеної полуниці не піддавалися змінам під час підвищення температури полиць на відміну від банану.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Design and performance evaluation of a multipurpose conductive rotary dryer. URL: <https://www.researchgate.net/publication/360121819>.
2. Energy consumption of agricultural dryers: an overview. URL: <https://www.researchgate.net/publication/311651452>.
3. Drying of herbal plants as a method of management of wasteland. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-8d9a198a-bf4b-49c4-9608-cdfff6c67284>.
4. Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування. Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6436/1/27.pdf>.
5. Снежкін Ю.Ф. Зниження енерговитрат при переробці фруктовово-овочевої сировини. Наук. праці ОНАХТ. Одеса, 2006. Вип. 28. Т.2. С.71-73.
6. Розвиток відновлювальних джерел енергії в Україні // Інформаційний портал Житло. Режим доступу: <http://www.zhytlo.in.ua>.
7. Effect of time-based hot air drying method on chemical composition of tea. URL: <http://ulspace.ul.ac.za/handle/10386/1914>.
8. Photovoltaic solar drying and how to use it. URL: <https://nenpower.com/blog/photovoltaic-solar-drying-and-how-to-use-it>.
9. Diseño y simulación de un secador de gramíneas mediante la implementación de colectores solares. URL: <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/a67ddb41-6cab-4910-b617-64f22900ff65/full>.
10. Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини. Х.: ХДУХТ. 2015. 159 с.
11. Канюк Г.І., Пугачова Т.М., Без'язичний В.Ф. Основи енерго- і ресурсозбереження. Харків: друкарня «Мадрид», 2016. 230 с.
12. Праховник А.В., Суходоля О.М. Енергозбереження в промисловості. Частина 1. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 180 с.
13. Зменшення енерговитрат в процесах сушіння. Режим доступу: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/49281/2/NHSCI\\_2025](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/49281/2/NHSCI_2025).
14. Control of industrial dryers. URL: <https://www.academia.edu/20980652>.
15. Intelligent control in drying. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9780429443183>.
16. Key control parameters of freeze-drying process. URL: <https://www.senier.com/11-key-control-parameters-of-freeze-drying-process>.
17. Сублімаційна сушка. Режим доступу: [https://vuzlit.com/1883901/sublimatsiyna\\_sushka](https://vuzlit.com/1883901/sublimatsiyna_sushka).
18. Технологія сублімаційної сушки продуктів. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tekhnologiya-sublimatsionnoy-sushki-produktov>.
19. Автоматизація процесів сушіння рослинної сировини. Режим доступу: [epozitory.zhatk.zt.ua/bitstream/123456789/770/1](http://epozitory.zhatk.zt.ua/bitstream/123456789/770/1).
20. How freeze-drying works. URL: <https://science.howstuffworks.com/innovation/edible-innovations.drying2.htm>.

					<b>ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

21. Нездвєцька І.В. Використання методів нечіткого моделювання при проектуванні сушильного обладнання / І.В. Нездвєцька, С.М. Кухарець // Науковий вісник НУБіП України. 2012. Вип. 170, Ч. 1. С. 376–383. Серія: Техніка та енергетика АПК.

22. Автоматичне керування процесом сушіння плодоовочевої сировини в конденсаційній термоелектричній сушарці. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/350989810>.

23. Application of freeze-drying in food processing and storage. A Review. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374145273>.

24. The freeze-drying of foods—the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7603155/>.

25. Сублімаційна сушка продуктів. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/sublimatsionnaya-sushka-produktov/>.

26. Як працює сублімація? Режим доступу: <https://frutta.ua/pages/how-it-works>.

27. Який робочий процес сублімаційної сушарки? Режим доступу: <https://ua.cnscentz.net/info/what-is-the-workflow-of-a-freeze-dryer-17198280978277376.html>.

28. Сублімаційна сушарка для дрібносерійного виробництва з полками 1,2 м<sup>2</sup>. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/catalog/sublimatsionnye-sushilki/sublimatsionnaya-sushilka-dlya-melkoseriynogo-proizvodstva-s-polkami-1-2-m2/>.

					<b>ІНІЕТ КНУ.133.ГМБ-24м.2025.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46