

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 переробних і харчових
виробництв»

_____ Цвіркун Л.О.
«___» _____ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробної і харчової промисловості»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ
ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____ Ларін Дмитро Олегович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

_____ зав.каф., к.т.н., доцент, Омельченко О.В. _____
(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
2026

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

Форма здобуття вищої освіти денна
Ступінь бакалавр
Галузь знань Механічна інженерія
Освітня програма Обладнання переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»
Цвіркун Л.О.
« » 2026 року

З А В Д А Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ларіну Дмитру Олеговичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах»

Керівник роботи к.т.н., доцент, Омельченко О.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом ректора Криворізького національного університету від «31» грудня 2025 р. № 85-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 12 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічна документація до устаткування.
2. Монографії, наукові статті, автореферати дисертацій, тези доповідей на наукові конференції.
3. Навчальна і методична література, інформація мережі Інтернет.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Аналіз обладнання для сублімаційного сушіння харчової сировини.
3. Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів сублімаційної сушарки.
4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.
6. Список використаних джерел.

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

Обладнання для сублімаційного сушіння сировини.

Система моніторингу та контролю основних параметрів сушіння.

Оптимізована конструкція сублімаційної сушарки.

Оцінка якості висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом.

6. Дата видачі завдання «02» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для сублімаційного сушіння харчової сировини	16.02.2026-10.03.2026
3	Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів сублімаційної сушарки	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ларін Д.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Омельченко О.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 11 рисунків. Список використаних джерел складається з 26 найменувань.

Об'єкт роботи – сублімаційна сушарка.

Предмет роботи – процес сушіння при низьких температурах.

Мета роботи – удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах.

У роботі зазначено, що альтернативою класичним методам сушіння є сублімація – технологія, яка базується на дегідратації в умовах вакууму матеріалу, що попередньо заморожений шляхом сублімації льоду та здійснюється при низьких температурах.

Запропоновано систему моніторингу та контролю параметрів процесу в режимі реального часу для контролю основних параметрів первинного та вторинного сушіння.

Вважається за доцільне здійснити наступні оптимізації:

Об'єднати сушильну систему та систему нагрівання в сублімаційній сушарці, бо у сублімаційному сушінні нагрівання є невід'ємною частиною самого процесу висушування, оскільки для переходу льоду в пару (сублімація) необхідне безперервно підводити тепло. Запропоновано, щоб система нагрівання складалася з трьох лоткових плит на які будуть встановлені нагрівальні елементи резистори, які контролюватимуться, щоб температура продукту не перевищувала 60°C для того, щоб процедура виділення пари була повільною. Полиці одночасно будуть і місцем висушування і джерелом тепла (полиці з терморегуляцію).

Розділити сушильну камеру та конденсатор в сублімаційній сушарці, що забезпечить двокамерне рішення (виносний конденсатор):

- попереджує ризик потрапляння льоду чи конденсату назад на сировину;
- дозволяє вимикати конденсатор для очищення від льоду не нагріваючи сам продукт у сушильній камері;
- наявність ізоляційного клапана між камерами дозволяє точно контролювати кінець сушіння.

Включити систему розморожування встановивши електричні резистори, які працюватимуть лише наприкінці процесу видалення вологи з продукту.

Здійснено оцінку якості отриманих висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом. Сушені банани методом сублімації показали деяке підвищення яскравості, а жовтизна залишалася стабільною порівняно зі свіжими зразками бананів. Конвективне сушіння через високі температури спричинило фізичні та хімічні зміни, а також руйнування текстури. Висока температура сушіння негативно вплинула на вологість та в'язкість продукту, що призвело до швидкої втрати структурної цілісності сировини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сублімаційна сушарка, система охолодження, система нагрівання, вакуумна система, система розморожування, сушильна камера, конденсаторна камера, банани.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУБЛІМАЦІЙНОГО СУШІННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Традиційні методи сушіння	7
1.2 Етапи сублімаційного сушіння	9
1.3 Процес сублімаційного сушіння	15
1.4 Обладнання для сублімаційного сушіння	17
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СУБЛІМАЦІЙНОЇ СУШАРКИ	22
2.1 Оптимізація циклів сублімаційного сушіння	22
2.2 Удосконалення сублімаційної сушарки	28
РОДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1 Вплив сублімації на фізичні властивості сировини	38
3.2 Оцінка якості висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом	39
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45
ДОДАТКИ	47

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Ларін				Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Омельченко						5	1
Н. Контр.	Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Затверд.	Цвіркун							

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що на сьогоднішній день методи збереження продуктів харчування засновані на процесі зневоднення з метою продовження терміну придатності. Проте тепло може змінювати органолептичні характеристики та впливати на втрату поживних харчових цінностей. Альтернативою класичним методам сушіння є сублімація – технологія, яка базується на дегідратації в умовах вакууму матеріалу, що попередньо заморожений шляхом сублімації льоду та здійснюється при низьких температурах.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах.

Практична та наукова новизна. Запропоновано систему моніторингу та контролю параметрів процесу в режимі реального часу для контролю основних параметрів первинного та вторинного сушіння.

Вважається за доцільне здійснити наступні оптимізації:

Об'єднати сушильну систему та систему нагрівання в сублімаційній сушарці, бо у сублімаційному сушінні нагрівання є невід'ємною частиною самого процесу висушування, оскільки для переходу льоду в пару (сублімація) необхідне безперервно підводити тепло. Запропоновано, щоб система нагрівання складалася з трьох лоткових плит на які будуть встановлені нагрівальні елементи резистори, які контролюватимуться, щоб температура продукту не перевищувала 60°C для того щоб процедура виділення пари була повільною. Полиці одночасно будуть і місцем висушування і джерелом тепла (полиці з терморегуляцією).

Розділити сушильну камеру та конденсатор в сублімаційній сушарці, що забезпечить двокамерне рішення (виносний конденсатор):

- попереджує ризик потрапляння льоду чи конденсату назад на сировину;
- дозволяє вимикати конденсатор для очищення від льоду, не нагріваючи сам продукт у сушильній камері;
- наявність ізоляційного клапана між камерами дозволяє точно контролювати кінець сушіння.

Включити систему розморожування встановивши електричні резистори, які працюватимуть лише наприкінці процесу видалення вологи з продукту.

Здійснено оцінку якості отриманих висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом. Сушені банани методом сублімації показали деяке підвищення яскравості, а жовтизна залишалася стабільною порівняно зі свіжими зразками бананів. Конвективне сушіння через високі температури спричинило фізичні та хімічні зміни, а також руйнування текстури. Висока температура сушіння негативно вплинула на вологість та в'язкість продукту, що призвело до швидкої втрати структурної цілісності сировини.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах				Літ.	Арк.	Аркуші
Розроб.	Ларін										
Перевір.	Омельченко									6	1
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Н. Контр.	Омельченко										
Затверд.	Цвіркун										

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУБЛІМАЦІЙНОГО СУШІННЯ

ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

1.1 Традиційні методи сушіння

На сьогоднішній день методи збереження продуктів харчування засновані на процесі зневоднення, використовуються харчовою промисловістю протягом тривалого часу з метою продовження терміну придатності та більш ефективного використання продуктів, зокрема таких як фрукти, що є дуже швидкопсувними і мають термін зберігання менше 20 днів, що безпосередньо впливає на втрату їх сенсорних характеристик [1-3]. За допомогою традиційних методів дегідратації тепло застосовується для видалення води з сировини, а її збереження відбувається за рахунок зниження активності води. Проте тепло може змінювати органолептичні характеристики та викликати на втрату поживних харчових цінностей. Сьогодні існує багато методів сушіння продуктів, серед яких найбільш поширені традиційні методи сушіння, а саме примусове конвекційне сушіння, сушіння гарячим повітрям конвекційним методом, діелектричне сушіння, сублімаційне сушіння тощо.

Примусове конвекційне сушіння є поширеною технологією, де продукти харчування, такі як зерно, кукурудза та пшениця сушать до необхідного рівня вологості після чого продукти зберігаються у сховищах. Примусова конвекційна сушка використовує вільне але обмежене потенційне зовнішнє повітря для зниження вмісту води в продукті [1-3, 17]. Хоча це повільний метод сушіння, проте він вважається ефективним і економічним завдяки своїй простоті та відносно низькому енергоспоживанню. Інколи використовують обігрів для підвищення потенціалу поглинання вологи повітрям але високі температури мають шкідливий вплив на зерно через тріщини, які спричинені внутрішніми температурними градієнтами. Хоча примусова конвекційна сушка вважається надзвичайно економічною та простою у неї є й інші переваги та недоліки. Переваги сушіння примусовою конвекцією [3]:

- оскільки вентилятори є єдиними рухомими механічними частинами, система вважається простою та легкою в експлуатації, обслуговуванні та контролі;
- експлуатаційні витрати низькі порівняно з системами гарячого повітря завдяки зниженому споживанню енергії;
- нижча температура сушіння покращує якість продукту і зернова сировина не має тріщин, які з'являються від напруги.

Недоліки сушіння примусовою конвекцією [3]:

- порівняно з іншими нагрівальними системами сушіння проходить дуже повільно і 60-денні періоди сушіння не є рідкістю;

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Ларін			Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах			Літ.		Арк.	Аркуші	
Перевір.		Омельченко								7	15	
Н. Контр.		Омельченко						ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Затверд.		Цвіркун										

- тривалі терміни сушіння можуть призвести до того, що продукт буде лише частково висушеним через сезонні зміни, а подальше сушіння можливе лише тоді, коли умови дозволяють;
- зовнішнє повітря, що містить хімічні речовини, пилові частки та шкідливі аеробні організми може забруднити продукт через вже високий тиск, який необхідно подолати, а фільтри вважаються непрактичними;
- необхідне належне управління та контроль для безперервної оцінки якості продукту з метою забезпечення її підтримки.

Конвекційне сушіння гарячим повітрям схоже на сушіння з примусовою конвекцією. Процес відбувається у відкритій системі при якому зовнішнє повітря затягується через вентилятор. До потоку повітря додається нагрів за допомогою газових пальників, парових змішувачів або електричних нагрівальних елементів [1-3, 22, 23]. Хоча нагрівальні елементи є найпоширенішим методом обігріву, проте їх вважають дуже дорогими з точки зору енергетичних витрат. Парові змішувачі використовують, якщо біомаса, вугілля або рідке паливо доступні і якщо витрати не високі. Конвекційне сушіння гарячим повітрям є застосованим у всьому світі через скорочений час сушіння та відносну простоту процесу. Проте підвищена температура для сушіння не завжди рекомендується, оскільки більшість харчових продуктів краще сушити при більш низьких температурах.

Діелектричне сушіння передбачає видалення вологи за допомогою високочастотних радіохвиль або мікрохвиль. Однією з головних переваг цього методу є короткий час сушіння, який можна досягти на відміну від сушіння гарячим повітрям за допомогою конвекції. Нагрівання всередині продукту відбувається швидко завдяки проникній дії електромагнітних хвиль довгої довжини, що викликає практично миттєвий та рівномірний нагрів. Той самий принцип використовується в побутових мікрохвильових печах, що швидко нагрівають сировину на відміну від нагрівання в духовці або інших методів, що залежать від конвекції, випромінювання та теплопровідності через продукт. Це забезпечує рівномірне внутрішнє нагрівання, яке зрештою подолає енергію активації або енергію міграції молекул води, що в подальшому збільшує швидкість міжвузлової або замісної дифузії [1-3]. Діелектричне сушіння здобуло поширення останнім часом, проте воно має своє поле застосування. Хоча діелектричне сушіння вважається енергоефективним, його не можна застосовувати до будь-якого продукту через високі температури. Деякі застосування використовують комбінацію інших методів разом з діелектричним сушінням, наприклад, в поєднання з гарячим повітрям або з вакуумом із діелектричним сушінням.

Сублімаційне сушіння є ефективним методом під час якого сировина швидко заморожується до дуже низьких температур, зазвичай -65°C , щоб уникнути росту кристалів льоду. Тиск знижується так, щоб крижана вода миттєво переходила з твердого стану в газоподібний, що відоме як сублімація. Уникаючи росту кристалів льоду клітини залишаються неушкодженими, що забезпечує якісний продукт, який зберігає свою форму, колір та текстуру. Низька температура додатково пригнічує ріст мікроорганізмів і повністю

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зберігає харчову цінність продукту. Проте можлива регідратація і мікроорганізми не повністю деактивуються, тому небажані організми можуть розвиватися одразу після відновлення рівня вологості. Правильна упаковка є необхідною для збереження продукту в зневодненому стані, що продовжує термін його зберігання. Проте сублімаційне сушіння є дуже енерговитратним процесом і тому не використовується широко в промисловості, процес також є повільним. Проте якість продукту помітно вища, ніж при інших методах сушіння, а структура та текстура кращі. Крім того, сублімаційне сушіння покращує аромат продукту.

Ефективність сушіння не слід обмежувати лише енергоефективним сушильним обладнанням, а варто також враховувати якість продукту (тобто смак, поживні речовини, колір, зовнішній вигляд та текстуру) та продуктивність при найменших можливих експлуатаційних витратах і мінімальному впливі на навколишнє середовище. Фактори, що впливають на ефективність сушіння [1-3]:

- температура впливає на якість продукту, а потім на продуктивність та експлуатаційні витрати;
- однорідність сушіння впливає на якість продукту, а потім на продуктивність та експлуатаційні витрати;
- тривалість сушіння перш за все впливає на продуктивність, а потім на якість та експлуатаційні витрати;
- споживання енергії впливає на експлуатаційні витрати, а потім на вплив на навколишнє середовище.

1.2. Етапи сублімаційного сушіння

На сьогоднішній день процеси сушіння здійснюються за допомогою традиційних методів дегідратації, які безпосередньо впливають на продуктивність, оскільки проводяться при відносно високих температурах, що безпосередньо впливають на властивості продукту, що може призвести до зниження якості продукту. Сублімаційне сушіння – це метод холодного сушіння, який використовується для збереження різних харчових матеріалів, застосовуваний для дегідратації чутливих продуктів, таких як кава та соки, або для сушіння твердих продуктів, таких як фрукти, креветки, курка, нарізані гриби, а інколи й великі шматки, наприклад, стейки або відбивні [1, 4]. Крім ніжних кольорів і смаків ці продукти мають текстурні та зовнішні характеристики, які неможливо зберегти жодним іншим сучасним методом сушіння. Сублімація розроблена для дегідратації та збереження продуктів без втрати сполук, відповідальних за аромати у сировині, які можуть губитися під час звичайних операцій сушіння.

Наприклад, делікатний фрукт є м'яким, крихким і майже повністю складається з води. Будь-який із традиційних методів сушіння, що використовують тепло, призводить би до сильного скорочення, деформації та втрати природної текстури фруктів. Після відновлення такі ягоди вже не мали б свого природного кольору, смаку та нагадували б варення. Це можна значною

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

мірою запобігти, висушуючи фрукт у замороженому стані таким чином, щоб він не зменшувався та не деформувався, втрачаючи вологу. Процес сублімації полягає у висушуванні попередньо замороженого продукту шляхом сублімації льоду під вакуумом. Таким чином відбувається прямий перехід льоду (твердого стану) у газ (пару) без появи води у рідкому стані. Отримують суху, пухку масу приблизно того ж розміру, що й оригінальна заморожена маса, підвищуючи її стабільність і дозволяючи легко розчиняти її у воді. Сублімаційний продукт, який був належним чином упакований, можна зберігати необмежений час, зберігаючи більшість фізичних, хімічних та сенсорних властивостей у свіжому стані.

Принцип на якому базується процес сублімації полягає в тому, що за певних умов низької температури та парціального тиску водяної пари вода випаровується з льоду. Коли сировина переходить безпосередньо з твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу сировина сублімується. Якщо парціальний тиск води у продукті підтримується нижче 610,5 Па, а вода заморожена при 0°C або нижче то під час нагрівання харчового продукту лід безпосередньо сублімуватиме у пару, не досягаючи плавлення. За цих умов вода залишається замерзлою і швидкість з якою молекули води виходять з крижини більша за швидкість з якою молекули навколишнього середовища повертаються до замерзлого блоку [4, 5]. У вакуумній камері до замороженої сировини подається тепло для прискорення сублімації, підтримується достатньо високий вакуум, тобто зазвичай у межах приблизно від 0,1 до 2 мм рт. ст., а тепло контролюється так, щоб його інтенсивність була трохи меншою, ніж необхідна для розтоплення льоду, досягається майже максимальна швидкість сублімації водяної пари. Сублімація відбувається з поверхні льоду, тому у процесі кордон льоду відсувається до центру продукту, тобто сировина зневоднюється від поверхні всередину, а останній залишок льоду сублімується і вологість знижується до менше ніж 5%. Оскільки заморожена сировина залишається твердою під час сублімації то молекули води, що виділяються, залишають порожнини, що утворює суху, пористу та губчасту структуру. Тому сублімаційні продукти швидко відновлюються але їх потрібно захищати за допомогою відповідної упаковки від абсорбції атмосферної вологи та кисню.

Метод сублімації був розроблений з метою зменшення втрат сполук, які відповідають за смак та аромат у продуктах харчування, що втрачаються під час звичайних процесів сушіння. Процес сублімації складається з двох етапів: перший полягає у заморожуванні продукту, а на другому етапі продукт сушиться шляхом прямої сублімації льоду під зменшеним тиском [4]. Вода видаляється шляхом сублімації, що є перетворенням твердого тіла в газ без проходження через рідку фазу, а не традиційним випаровуванням. Спочатку відбувається швидке заморожування продукту, що призводить до утворення льоду, який забезпечує легке видалення води, потім тиск всередині устаткування починає різко знижуватися нижче трьохфазної точки і нарешті подається тепло через нагрівання в невеликих кількостях, достатніх для процесу сублімації. У процесі сублімації початкове заморожування повинно бути дуже швидким з метою отримання продукту з маленькими кристалами та в

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аморфному стані. Етапи сушіння проводяться при низькому тиску, щоб забезпечити сублімацію льоду. Процес повної сублімації продукту складається з трьох основних етапів:

У процесі заморожування зразок сировини твердне по мірі зниження температури нижче кривої замерзання і під час цього етапу утворюються кристали льоду. Процес зазвичай займає кілька годин, щоб забезпечити повне заморожування зразка [4, 5]. Первинне сушіння – кристали льоду у замороженому зразку сублімують під вакуумом (зазвичай у межах 4–27 Па). У твердому матриксі утворюються пори, які раніше займали кристали льоду. Пара води, що утворюється під час сушіння, переміщується до поверхні матеріалу перед тим, як її видалять. Вторинна сушка – зв'язана вода в твердому матриксі десорбується при підвищенні температури полиці.

Початкове заморожування – першим етапом сублімації, яким є заморожування продукту у звичайному обладнанні. Заморожування – це процес збереження, який виникає внаслідок зниження температури нижче тієї при якій починають утворюватися кристали в харчовому матеріалі. Як операція, що передує сублімації заморожування визначально впливає на такі характеристики, як колір і щільність готового продукту, а також на швидкість сублімації. Тривалість процесу та тип використовуваного обладнання залежать від різних факторів, таких як кількість, концентрація та характер самого продукту. Температура заморожування для продуктів харчування нижча, ніж для чистої води, оскільки розчинені речовини у незамерзлій воді концентруються і температура замерзання поступово знижується поки розчин повністю не замерзне [4, 5]. До кінця заморожування вся маса продукту стає твердою, утворюючи евтектику, що складається з кристалів льоду та компонентів продукту. Необхідно досягти евтектичного стану, щоб забезпечити видалення води лише шляхом сублімації, а не поєднання сублімації та випаровування. Маленькі продукти заморожуються швидше утворюючи маленькі кристали, які менш шкодять їхній структурі. У рідких продуктах заморожування відбувається повільніше з метою формування кристалічної сітки, що утворює канали через які може виходити водяна пара. Належне заморожування є основою того, щоб сублімований продукт мав оптимальні умови зовнішнього вигляду, збереження своїх властивостей та швидкого відновлення води.

Заморожування – це метод, який видаляє воду з харчових продуктів у формі кристалів льоду. Процес широко використовується у харчовій промисловості. Наприклад, м'ясо, овочі та фрукти заморожують для подовження терміну зберігання, тоді як заморожені десерти (морозиво чи сорбет) виготовляють для задоволення потреб споживачів. Заморожування також є першим кроком у процесі сублімації для виробництва зневоднених харчових продуктів [10]. Контроль процесу заморожування має велике значення, оскільки він визначає формування та морфологію кристалів льоду (розмір та форма), що впливає на текстуру, якість та стабільність зберігання заморожених або подальше лідо-сушених продуктів. Великі кристали льоду, що утворюються під час повільного заморожування призводять до великих пор у під час первинного сушіння. Для покращення умов процесу важливо розуміти

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механізми кристалізації води та параметри, що впливають на кристалізацію.

Кожен продукт повинен заморожуватися таким чином, щоб гарантувати мінімальні зміни в подальшому процесі сублімації. Необхідно точно знати: температуру при якій відбувається максимальне тверднення, оптимальну швидкість охолодження та мінімальну температуру початкового плавлення. Прагнуть до того, щоб вже заморожений продукт мав твердну структуру без порожнин в яких концентрується рідина, щоб забезпечити, що весь процес сушіння пройде через сублімацію. Перехід від льоду до пари вимагає великої кількості енергії, яка подається у високому вакуумі, оскільки зона сушіння рухається до внутрішньої частини зразка і тепло має проходити через заморожені шари, що створює значний ризик розплавлення проміжного матеріалу або підгоряння поверхні продукту, який вже висох [4, 5, 10]. Передачі матеріалу та тепла під час сублімації можна узагальнити через дифузію водяної пари від фронту сублімації та випромінювання і проведення тепла від нагрівальної плити. Передача маси відбувається через міграцію парів через сухий шар продукту під дією різниці тисків; ця передача велика, коли різниця тисків значна. Як у будь-якому процесі сушіння співіснують методи передачі тепла та матеріалу. Крива передачі тепла залежно від часу отримується множенням кількості сублімованої води на відповідне її тепло сублімації або десорбції. Існує кілька факторів, що визначають кристалізацію і вони часто впливають один на одного.

Швидкість заморожування важлива для визначення кількості кристалів льоду, що утворюються до того, як система переходить у скляний стан та морфології кристалів льоду. При високих швидкостях заморожування кількість кристалізованої води в системі зменшується, тобто кількість незамерзлої води (скляної води) збільшується. Якщо швидкість охолодження достатньо висока то відбувається не кристалізація води, а лише скляний перехід. Швидкість заморожування також визначає розмір утворених кристалів льоду [10]. Швидке заморожування призводить до утворення кристалів льоду маленького розміру, але великої кількості, тоді як повільне заморожування дає великі і менш численні кристали льоду, що, у свою чергу уповільнює основну швидкість сушіння під час заморожування. Кристалізація включає видалення прихованої теплоти, тому швидке заморожування, яке забезпечує швидкий перенос прихованої теплоти, призводить до утворення більшої кількості ядер, а простір для росту кожного кристала зменшується і таким чином утворюється велика кількість маленьких кристалів льоду.

Кристалізація відбувається лише в межах температурного діапазону між температурою рівноважного замерзання та температурою склоподібного переходу. Вище температури кристалізація термодинамічно неможлива, а нижче температури склоподібний перехід обмежує ріст кристалів кінетично. У межах цього температурного діапазону зі зниженням температури швидкість росту кристалів спочатку зростає через збільшення рушійної сили, а потім зменшується при подальшому зниженні температури, оскільки дуже низька температура обмежує молекулярну рухливість. Температура замерзання також може впливати на швидкість кристалізації води через свій вплив на швидкість

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

замерзання [6, 8, 10]. При зниженні температури замерзання швидкість замерзання зростає, що призводить до утворення великої кількості дрібних кристалів льоду. Концентрація твердих речовин (або вміст води) відіграє важливу роль у формуванні льодових кристалів. Збільшення вмісту твердих речовин у системі призводить до зниження точки замерзання та підвищення температури склоподібного переходу. Пониження точки замерзання залежить від кількості молей розчиненої речовини, а не від маси розчиненої речовини в розчині. Зі збільшенням концентрації твердого тіла кількість води, яка не кристалізується при заморожуванні, також збільшується.

Контроль за етапом заморожування має значний вплив на процес сублімації та якість кінцевого продукту, оскільки швидкість сублімації суттєво залежить від морфології льоду. Великі кристали льоду, що зазвичай утворюються при повільному охолодженні, сприяють легшій сублімації під час первинного сушіння та прискорюють первинне сушіння. Швидке заморожування/низька температура призводять до утворення дрібних кристалів льоду, більшого опору продукту та довшого часу первинного сушіння.

Сублімація або первинне висушування – етап на якому більшість вільної води переходить у пару. Якщо тиск водяної пари в продукті підтримується нижче 610,5 Па і вода в продукті знаходиться в замороженому стані то при нагріванні продукту лід сублімує безпосередньо у пару не розтанувши, через низький тиск у сушильній камері. Випарник запобігає поверненню водяної пари до продукту. Двигуном сублімації є різниця між тиском водяної пари на межі льоду та частковим тиском водяної пари в сушильній камері. Енергія для сублімації льоду постачається через радіацію або теплопровідність через заморожений продукт. На цьому етапі продукт сублімує до вмісту води 15% (по відношенню до його сирової ваги) [4, 5]. Параметри температура, тиск і час можуть змінюватися незалежно один від одного але вони тісно взаємопов'язані, тому неможливо змінити один без впливу на інші і їх завжди слід розглядати разом і аналізувати їхній вплив. На першому етапі лід видаляється із зразка шляхом сублімації зі твердої фази у газоподібну. Поки існує система, яка постійно видаляє цю пару процес висушування шляхом сублімації триватиме до повного вичерпання наявного льоду. У субліматорі цю функцію виконує конденсатор – елемент обладнання, який має достатньо холодну поверхню, щоб водяна пара знову переходила у тверду фазу.

Після того як продукт повністю затвердів під час процесу заморожування, у камеру субліматора подається вакуум і починається первинне сушіння. Під час первинного сушіння існує кілька типів передачі тепла в продукт головним чином шляхом теплопровідності від полиці та радіації від стінки камери. Під час сушіння методом заморожування лід починає сублімувати з поверхні зразка. Утворюється рухомий фронт між замороженим шаром (з високим вмістом води) та сухим шаром (з низьким вмістом води) [8]. Площина сублімації, яку часто називають поверхнею сублімації або фронтом сублімації, починається на зовнішній поверхні зразка, а потім рухається всередину. Над фронтом сублімації знаходиться пористий висушений матеріал, а під ним – заморожений матеріал. Сублімована водяна пара, що утворюється на фронті

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

сублімації, переноситься через висушений (пористий) шар на поверхню і виходить з зразка. Положення шару сублімації переміщується з верхньої частини (на початку первинного сушіння) до нижньої частини зразка [10]. Теоретично вміст вологи високий у замороженому шарі і різко знижується до дуже низького значення в висушеному шарі. На практиці фронт сублімації є перехідним шаром, де волога різко, але безперервно знижується до низького значення у висушеному шарі. Первинне сушіння є найдовшим етапом сублімації і становить половину від загального споживання енергії. Оптимізація первинного сушіння для скорочення часу сублімації є одним із способів зменшити енергетичні витрати під час сублімації.

Під час первинного сушіння, коли вміст вологи в зразку зменшується то матриця стає більш стабільною і може зберігати структуру при вищій температурі без переходу в рідкий стан. Температуру полиць можна збільшити для прискорення сублімації, оскільки підвищення температури збільшує тиск водяної пари (рухома сила для видалення води). Проте, якщо температура зразка підвищується швидше, ніж температура руйнування, зразок руйнується. Тому віддають перевагу повільному нагріванню від первинного до вторинного сушіння. Повільна швидкість нагрівання (наприклад, 5-9°C/год), як повідомляється, зменшує ймовірність руйнування структури [4-5, 10]. Вторинне сушіння починається після завершення первинного сублімаційного сушіння і випаровування всього льоду. В продукті все ще присутня пов'язана волога, проте продукт здається сухим але залишковий вміст вологи може досягати 7–8%, тому продовжуване сушіння при більш високій температурі необхідне для зниження залишкової вологості до оптимальних значень. Вторинне сушіння зазвичай проводиться при температурі продукту вище кімнатної, але сумісній із чутливістю продукту. На відміну від умов первинного сушіння, які використовують низьку температуру полиць і помірний вакуум, десорбційне сушіння проходить з підвищенням температури полиць і зниженням тиску в камері до мінімуму.

На етапі вторинного сушіння залишки води, які не замерзли і не сублімують на першому етапі сушіння випаровуються на другому етапі через підвищення температури матриці продукту. Важливо враховувати, що сухі частини зразка, які сублімуються можуть почати своє вторинне сушіння навіть якщо в продукті ще присутній лід, що сублімує в первинній фазі. Поки ці дві фази співіснують, і оскільки лід, що сублімує, охолоджує структуру, температура продукту залишається контрольованою. Коли зникає остання порція льоду відбувається підвищення температури [4, 5, 8]. Вторинний етап сушіння починається, коли лід у продукті вичерпано і волога походить з частково зв'язаної води в матеріалі, що сушиться. Його завдання – видалити залишки водяної пари, випарюючи незамерзлу воду пов'язану з продуктом.

Підтримуючи обладнання під низьким тиском і підвищуючи температуру до значення, яке наближене до температури навколишнього середовища. Підтримуючи тиск у субліматорі нижче, ніж тиск пари на поверхні льоду (за допомогою вакуумного насоса) та конденсуючи пар за допомогою спірального конденсатора (при низькій температурі) досягають того, що сублімація

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

продовжується, а водяна пара виходить із продукту через канали, які утворені в результаті сублімації льоду. При втраті води через випаровування незамерзлої води вміст води зменшується до 2% (відносно його сирової ваги). Вторинне сушіння може перекриватися з первинним сушінням і вторинне сушіння домінує в процесі тільки після завершення первинного сушіння.

1.3 Процес сублімаційного сушіння

На сьогоднішній день методи збереження продуктів харчування засновані на процесі зневоднення, використовуються харчовою промисловістю протягом тривалого часу з метою продовження терміну придатності та більш ефективного використання продуктів, зокрема тих, як фрукти, що є дуже швидкопсувними і мають невеликий термін зберігання, що безпосередньо впливає на втрату їх сенсорних характеристик. За допомогою традиційних методів дегідратації тепло, застосовується для видалення води з сировини, а її збереження відбувається за рахунок зниження активності води, проте тепло змінює органолептичні характеристики та викликає втрати поживної цінності. При сублімації продукт зберігається шляхом зменшення активності води але в цьому випадку його не нагрівають, тому органолептичні характеристики та поживна цінність зазнають менших змін.

Сублімація – це метод при якому відбувається видалення води з обраного матеріалу. Дегідратація відбувається за допомогою вакуумної сублімації, що означає, що сировина повинна бути на початку замороженою, а сушіння проходить при температурі та тиску значення яких нижчі за тиск менше 611 Па і температура менше 0,01°C або наявного розчинника. Метод є більш делікатний, ніж класичне сушіння високими температурами. Завдяки цьому сировина зберігає свою структуру, колір, смак, запах та термочутливі речовини. Перші комерційні застосування стосувалися фармацевтичної промисловості (кров'яна плазма, живі клітини, антибіотики) [26]. У харчовій промисловості ліофілізація почала застосовуватися тільки наприкінці 50-х років 20 століття. Сублімація – це процес при якому вода замерзає після чого її видаляють із сировини: спочатку за допомогою сублімації (первинне сушіння), а потім за допомогою десорбції (вторинне сушіння). Сублімаційне сушіння – це процес при якому вода сублімується з продукту після його заморожування. Термін «сублімація» описує процес, який спрямований на отримання продукту, який «знаходиться в сухому стані» [20]. Основний принцип сублімації полягає в тому, що вода переходить безпосередньо зі стану твердої речовини (льоду) в пароподібний стан не проходячи через рідкий стан. Сировина, що підлягає сушінню спочатку заморожують, а потім піддають впливу високого вакууму та нагріванню (проведенням тепла, випромінюванням або обома способами) так, щоб замерзла рідина сублімувала залишаючи лише тверді висушені компоненти рідини. Градієнт концентрації водяної пари між фронтом сушіння та конденсатором є рушійною силою для видалення води під час сублімації.

Процес починається з попереднього заморожування сировини у звичайній установці. Менші за розміром продукти заморожуються швидше, утворюючи

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

маленькі кристали, які менш руйнують їхню структуру. У рідких продуктах прагнуть до повільного заморожування, щоб утворилася кристалічна сітка, яка створює канали через які може виходити водяна пара. Загалом можна сказати, що належне заморожування є основою для того, щоб сублімаційний продукт мав оптимальні умови вигляду, зберігання своїх властивостей і швидкого відновлення вологи. Заморожений продукт доставляють у камеру сублімації, де його температуру слід знизити нижче -40°C . У цьому випадку тиск у камері зменшують вакуумним насосом до нижче 610 Па [4, 5, 20]. Після досягнення вакууму починають подавати тепло до продукту через нагрівальні елементи з метою прискорення сублімації. Принцип заморожування/сублімаційного сушіння базується на цьому фізичному факті: лід у продукті безпосередньо перетворюється на водяну пару (не проходячи через «рідкий стан»), якщо частковий тиск водяної пари в навколишньому середовищі нижчий за частковий тиск льоду при відповідній температурі.

Випарник запобігає поверненню водяної пари до продукту, а наступний період підтримує достатньо високе вакуумне середовище при цьому тиск у субліматорі знаходиться нижче тиску пари на поверхні льоду і контролює тепло так, щоб його інтенсивність була трохи меншою, ніж та, яка потрібна для розчинення льоду, межа льоду відступає до центру сировини, тобто зневоднюється з поверхні всередину. На цьому етапі продукт сублімується до вмісту води 15% (від вологої маси). Останній етап сушіння починається, коли лід у продукті зникає, а волога походить із частково зв'язаної води в матеріалі, що сушиться. Мета – видалити останні залишки водяної пари випарюючи незамерзлу воду, яка пов'язана з продуктом.

Обладнання підтримується під низьким тиском, а температура підвищується до значення близького до температури навколишнього середовища. Сублімація продовжується і фронт сублімації переміщується всередину продукту вода у вигляді пари виходить з продукту через канали, утворені сублімацією льоду. На цьому етапі вологість продукту зменшується до 2% (відносно його сирої ваги). Оскільки заморожена сировина залишається необхідним під час сублімації, молекули води, що виходять залишають порожнини, утворюючи суху, пористу та пухку структуру. Тому сублімовану сировину можна швидко відновити але її потрібно захищати за допомогою відповідної упаковки від поглинання атмосферної вологи та кисню.

Переваги сублімації [3-5, 11]:

- температура, якій піддається продукт нижча, що сприяє тому, що багато нестабільних речовин не зазнають фізичних змін;
- зберігає оригінальні характеристики продукту включаючи: колір, форму, розмір, смак, текстуру, поживні речовини;
- висока пористість продукту сприяє швидкому відновленню шляхом додавання води або відповідного розчинника;
- стабільність за кімнатної температури;
- зберігання в холоді не є необхідним;
- оскільки залишкова вологість незначна то продукт може зберігатися протягом обмеженого часу утворюючи продукти з тривалим терміном

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільності;

- залишки не утворюються;
- готовий продукт легкий та зручний у використанні;
- вартість транспортування знижується завдяки низькій вазі та відсутності потреби в охолодженні;
- забезпечує оптимальну якість сухого продукту порівняно з іншими методами сушіння;
- через низьку температуру при якій здійснюється обробка, втрати летких компонентів мінімальні, зменшується ризик мікробного забруднення, а ферментні препарати не зазнають змін;
- сублімовані продукти не відчують структурних змін або усадки, а їх запах і аромат залишаються стабільним, при цьому втрати поживних речовин мінімальні.

Недоліки сублімації [3-5, 11]:

- високі інвестиційні витрати на обладнання та приміщення;
- необхідність додаткових приміщень на утримання;
- процес зазвичай триває кілька днів;
- вимагає численних погоджених етапів;
- попередня обробка продукту є складною.

Традиційна сублімація – це складний процес, який вимагає ретельного балансування продукту, обладнання та методів обробки. При правильному проведенні процес, забезпечує в продукті відмінні розчинні характеристики, що дозволяє швидко відновлювати його у стан розчину. Сполуки, які чутливі до тепла та вологі зберігають свою активність. Більшість білків не денатурує під час процесу, а ріст бактерій та дія ферментів можуть бути усунені.

1.4 Обладнання для сублімаційного сушіння

Субліматори складаються з вакуумної камери, що оснащена лотками на які поміщають продукт для сублімування та нагрівачами для забезпечення теплоти сублімації. Для конденсації пари використовують охолоджувальні спіралі, які обладнані автоматичною системою розморожування, щоб підтримувати їх у вільному від льоду стані та зберігати їхню конденсаційну здатність. Цей аспект дуже важливий, оскільки більшість енергії витрачається на охолодження конденсаторів, і, отже, ефективність сублімування визначається ефективністю конденсатора.

Неконденсуємні пари видаляються за допомогою вакуумних насосів. Обладнання характеризується методом подачі тепла на поверхню продукту. Найбільш часто використовуваними системами є: провідність та випромінювання. Для кожного типу субліматорів існують періодичні та безперервні типи обладнання. У періодичних установках лотки завантажуються замороженим продуктом, герметично закривається камера та створюється вакуум після чого продукт доводиться до температури сушіння протягом зазначеного часу для циклу [4-8]. Наприкінці циклу сушіння камеру заповнюють інертним газом, а потім відкривають. Тоді продукт витягують із

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

камери та упаковують. Відповідні умови для сублімації залежать від продукту, але його поверхнева температура в жодному разі не повинна перевищувати 60°C. У системах безперервної сублімації вхід і вихід лотків здійснюється через захисні заслінки. Лотки рухаються, розташовані між нагрівальними пластинами, у візках, які котяться по рейках через різні зони нагрівання камери, що підтримується під вакуумом. Температури нагрівання та час перебування в кожній зоні заздалегідь програмуються для кожного продукту, а мікрокомп'ютер вимірює та контролює час сублімації, температуру, тиск у камері та температуру на поверхні продукту. Розглянемо деякі види сублімаційних сушарок (рис. 1.1).

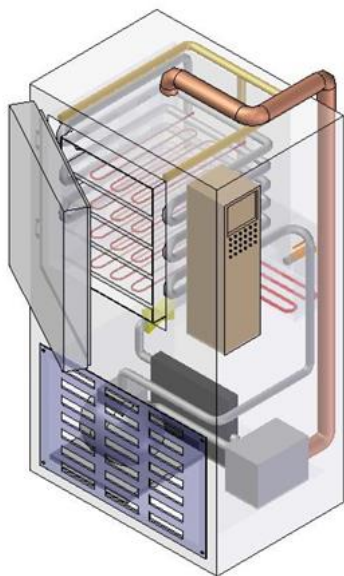


Рисунок 1.1 – Субліматор з квадратним дизайном камери

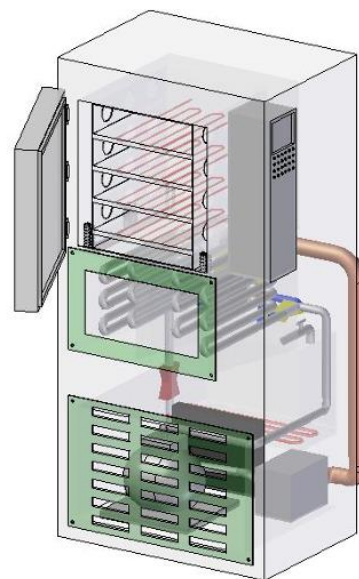


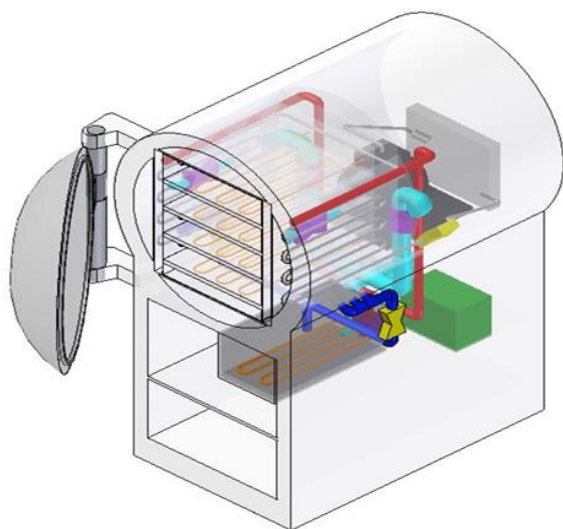
Рисунок 1.2 – Субліматора з подвійною камерою

Субліматор складається з обладнання з квадратним дизайном камери, його розміри: 1,30 м у висоту x 0,73 м у ширину x 0,5 м у глибину, система розморожування конденсатора за допомогою гарячої води, яка нагрівається через нагрівальний елемент, встановлений у нижній частині зливного бака; система охолодження розташована в нижній частині обладнання, а конденсатор знаходиться навколо робочої камери, тому це система з однією камерою. Система підігріву піддонів здійснюється за допомогою нагрівальних елементів, розташованих у кожному тримачі піддона [5]. Злив конденсаційної камери має нахилenu поверхню, яка направляє воду до бака самопливом. Обладнання оснащено двома клапанами для зливу, які можна відкрити або закрити вручну, маленький насос для розморожувальної рідини, який подає щойно нагріту воду через нагрівальний елемент до розпилювачів, розташованих у верхній частині камери над випарником системи охолодження. Вакуумна система розташована у верхній частині робочої камери безпосередньо від насоса.

Наступна конструкція субліматора з подвійною камерою у якій, у свою чергу, камера конденсації розділена на дві частини, щоб забезпечити безперервний процес, при якому, коли одна з камер поглинає вологу, інша

розморожується за допомогою водяної пари під тиском (рис. 1.2). Обидві камери герметизовані за допомогою механізму з клапанами або кришками, які закриваються пружинами з високою жорсткістю і відкриваються під вакуумом, що створюється насосом у кожній камері, що забезпечує повний і більш ефективний процес [4-8]. Обидві камери герметичні у яких є скло, що дозволяє візуально контролювати процес і рівень заморожування кожного конденсатора. Ця конструкція, будучи більш індивідуалізованою щодо своїх камер, має вакуумну лінію, яка ділиться на кожену камеру з відповідним клапаном на вході кожної камери, щоб забезпечити, що поки одна працює, а інша ні. Система підігріву працює за допомогою водяної пари, при цьому кожна камера має свій вхід пари, герметизований відповідним клапаном.

Наступна конструкція має компактну форму по висоті, але більшу по глибині, оскільки розміщує систему охолодження в задній частині робочої камери (рис. 1.3). Система з двома окремими камерами для безперервного процесу в якій кожна камера відкривається та закривається за допомогою



соленоїдного клапана, що активується, коли конденсатор кожної камери досяг максимальної здатності до замерзання водяної пари [5]. Система розморожування працює за допомогою розпилювачів гарячої води, що керуються електрично двома соленоїдними клапанами для переривчастої роботи під час розморожування. У нижній частині робочої камери є підставка на якій розташовані бак для зливу та зберігання води для розморожування та вакуумний насос.

Рисунок 1.3 – Субліматор з круглим дизайном камери

Останні досягнення у промисловій практиці зосереджені на безперервних методах сушіння, оскільки вони менш трудомісткі та дешевші за переривчасті процеси. Існує два типи безперервних сушарок: сушарка для лотків, де продукт розміщується на лотках, що рухаються вздовж сушарки безперервно та динамічні або сушарки без лотків, де продукт переміщається через сушарку за допомогою стрічок, рухомих плит, вібраційних плит, псевдозрідженого шару та розпилювання. На рисунку 1.4 представлено деякі з найпоширеніших промислових установок, що використовуються для обробки сублімованих продуктів. Більшість промислових підприємств мають камеру заморожування, відокремлену від камери сушіння, щоб прискорити початковий етап процесу сублімації.

Існує фактично три категорії субліматорів: колекторний, ротаційний та субліматор у вигляді лотка. Два компоненти є спільними для всіх типів субліматорів: вакуумний насос для зниження тиску газу в резервуарі, що

містить речовину для сушіння та конденсатор для видалення вологи шляхом конденсації на охолодженій поверхні до -40 до -80°C .

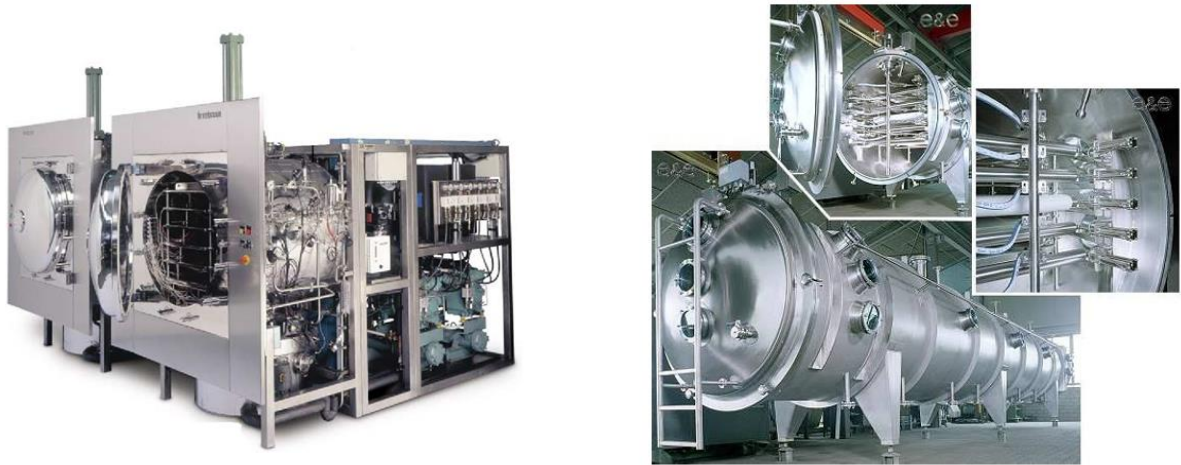


Рисунок 1.4 – Промислове обладнання для сублімаційного сушіння

Колекторні, ротаційні та лоткові субліматори відрізняються методом взаємодії висушеної речовини з конденсатором. У колекторних субліматорах з'єднання кількох контейнерів з висушеним продуктом до конденсатора зазвичай використовується коротка кругла трубка. Ротаційні та лоткові субліматори мають один великий резервуар для висушеної речовини. Ротаційні субліматори зазвичай використовуються для сушіння гранул, кубиків та інших сипучих речовин [12, 13, 20]. Ротаційні субліматори мають циліндричний резервуар, який обертається під час сушіння для досягнення більш рівномірного сушіння матеріалу. Лоткові зазвичай мають прямокутний резервуар з полицями на яких продукти можна розмішувати в піддонах та інших контейнерах. Колекторні субліматори зазвичай використовуються в лабораторних умовах при сушінні рідких речовин у невеликих контейнерах та коли продукт буде використаний протягом короткого часу. Колекторний субліматор висушить продукт до вмісту вологи менше 5%. Без нагріву можна досягти лише первинного сушіння (видалення вільної води). Для вторинного сушіння, яке видалить зв'язану воду та забезпечить нижчий вміст вологи, потрібно додати нагрівач.

Субліматори з лотковим типом зазвичай більші за колекторні сушарки та більш складні. Вони використовуються для сушіння різноманітних матеріалів та забезпечує виготовлення найсухішого продукту для тривалого зберігання. Субліматор з лотком дозволяє заморожувати продукт на місці та виконувати як первинне (видалення вільної води) так і вторинне (видалення зв'язаної води) тим самим отримуючи максимально сухий кінцевий продукт. Вони можуть сушити продукти масово або у флаконах чи інших контейнерах [12-13]. Субліматор складається з вакуумної камери, яка містить полиці для продуктів, здатні охолоджувати та нагрівати контейнери та їхній вміст. Вакуумний насос, холодильна установка та пов'язані з ними елементи керування підключені до вакуумної камери. Охолоджувальні елементи у полицях заморожують продукт. Після того як продукт заморожено, вмикається вакуумний насос і продукт нагрівається. Тепло передається через теплопровідність від полиці до продукту.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

На сьогоднішній день методи збереження продуктів харчування, засновані на процесі зневоднення, які використовуються харчовою промисловістю протягом тривалого часу з метою продовження терміну придатності та більш ефективного використання продуктів, зокрема таких як фрукти. За допомогою традиційних методів дегідратації тепло застосовується для видалення води з сировини, а її збереження відбувається за рахунок зниження активності води. Проте тепло може змінювати органолептичні характеристики та викликати на втрату поживних харчових цінностей. Альтернативою класичним методам сушіння є сублімація – технологія, яка базується на дегідратації в умовах вакууму матеріалу, що попередньо заморожений шляхом сублімації льоду та здійснюється при низьких температурах

Вважається, що сублімація – це процес при якому вода замерзає після чого її видаляють із сировини: спочатку за допомогою первинного сушіння, а потім за допомогою десорбції (вторинне сушіння). Сублімаційне сушіння – це процес при якому вода сублімується з продукту після його заморожування. Термін «сублімація» описує процес, спрямований на отримання продукту, який «знаходиться в сухому стані». Основний принцип сублімації полягає в тому, що вода переходить безпосередньо зі стану твердої речовини (льоду) в пароподібний стан не проходячи через рідкий стан. Сировина, що підлягає сушінню, спочатку заморожують, а потім піддають впливу високого вакууму та нагріванню (проведенням тепла, випромінюванням або обома способами) так, щоб замерзла рідина сублімувала, залишаючи лише тверді, висушені компоненти оригінальної рідини.

Аналіз наукових джерел сприяв узагальненню принципу процесу сублімації. Процес сублімації складається головним чином з трьох етапів: перший полягає у заморожуванні продукту, а на другому етапі продукт сушиться шляхом прямої сублімації льоду під зменшеним тиском, а на третьому етапі відбувається вторинне сушіння.

Субліматори бувають періодичної та безперервної роботи. У періодичних установках лотки завантажуються замороженим продуктом, герметично закривається камера та створюється вакуум після чого продукт доводиться до температури сушіння протягом зазначеного часу для циклу. У системах безперервної сублімації лотки рухаються, розташовані між нагрівальними пластинами, у візках, які переміщуються по рейках через різні зони нагрівання камери, що підтримується під вакуумом. Температури нагрівання та час перебування в кожній зоні заздалегідь програмуються для кожного продукту, а мікрокомп'ютер вимірює та контролює час сублімації, температуру, тиск у камері та температуру на поверхні продукту.

Зазначено, що існує три категорії субліматорів: колекторний, ротаційний та субліматор у вигляді лотка. Два компоненти є спільними для всіх типів субліматорів: вакуумний насос для зниження тиску газу в резервуарі, що містить речовину для сушіння та конденсатор для видалення вологи шляхом конденсації на охолодженій поверхні до -40 до -80°C .

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СУБЛІМАЦІЙНОЇ СУШАРКИ

2.1 Оптимізація циклів сублімаційного сушіння

Сублімаційне сушіння – це метод видалення води шляхом сублімації кристалів льоду з замороженого матеріалу, що використовується в харчовій промисловості з метою стабілізації та збереження продуктів, зменшуючи втрату нестійких сполук, що цікавлять підвищуючи їхню якість. Процес складається із попереднього заморожування продукту, а потім висушування під низьким тиском, яке проходить у два етапи: первинне сушіння або етап сублімації замерзлої води та вторинне сушіння або випаровування незамерзлої води. Обидва етапи сушіння зазвичай проводяться при низькому тиску, що дозволяє в обох випадках змінювати стан води при низьких температурах.

Процес сублімації складається з кількох етапів, які працюють разом для видалення води з замороженої сировини. Кожен етап вимагає точного контролю температури, вакууму та тривалості. Оптимізація циклів є надзвичайно важливою, особливо для продуктів, що виробляються у великому масштабі, де коефіцієнт вартості значно зростає з часом проведеним у морозильній сушарці [11-13]. Повністю оптимізований цикл використовує лише необхідну енергію та час, що призводить до коротшого часу процесу та більшої пропускної здатності продукту, а найголовніше – це забезпечення оптимальної якості та послідовності продукції між партіями. Вибір придатних параметрів процесу дозволяє отримувати продукцію найвищої якості порівняно з продуктами, висушеними традиційними методами. У харчовій промисловості сублімація поширена, але витратна, і тому однією з ключових цілей під час розробки процесу сублімаційного сушіння є мінімізація часу сушіння, а саме основного часу первинного сушіння, який є найдовшим із трьох етапів сублімаційного сушіння.

Одним із перших кроків оптимізації процесу сублімаційного сушіння є попередня обробка сировини, що може включати, наприклад, правильне заморожування продукту. Швидкість замерзання може суттєво вплинути на кінцеву якість сублімаційного сушіння. Повільна швидкість замерзання може призвести до утворення великих кристалів льоду, які можуть пошкодити структуру продукту [14-16]. З іншого боку, висока швидкість замерзання може призвести до утворення менших кристалів льоду, які зазвичай краще підтримують цілісність продукту. Ще одним аспектом попередньої обробки є підготовка сировини, яка має бути однаковою за розміром і формою, що допоможе забезпечити послідовність процесу сублімаційного сушіння для всієї

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Ларін</i>				Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					22	16
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	

сировини.

Розрахунок часу заморожування для банана

Теплопровідність сировини [27]

$$k = 0.388 \frac{W}{m \cdot K}$$

Власна теплоємність продукту та ентальпії

$$c_1 = 4.19 - 2.30x_s - 0.628x_s^3$$

$$c_1 = 4.19 - 2.30 \cdot (0.2574) - 0.628 \cdot (0.2574)^3$$

$$c_1 = 3.560 \frac{kJ}{kg \cdot K} = 3560 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Питома теплоємність при кінцевій температурі продукту [27]

$$c_s = 1.55 + 1.26x_s - \frac{(x_{wo} - x_b) \cdot L_o \cdot t_f}{t^2}$$

$$c_s = 1.55 + 1.26 \cdot (0.2574) - \frac{(0.7426 - 0.00412) \cdot 333.6 \frac{kJ}{kg} \cdot (-0.8) K}{(-30)^2 K^2}$$

$$c_s = 2.093 \frac{kJ}{kg \cdot K} = 2093 \frac{J}{kg \cdot K}$$

При температурі продукту

При кінцевій температурі продукту

$$c_1 = 3560 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$c_s = 2093 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$H_1 = 310\,600 \frac{J}{kg}$$

$$H_s = 20\,380 \frac{J}{kg}$$

Об'ємна різниця ентальпій між початковою точкою замерзання та температурою продукту

$$\Delta H = \rho_1 \cdot H_1 - \rho_s \cdot H_s$$

$$\Delta H = 988 \frac{kg}{m^3} \cdot 310\,600 \frac{J}{kg} - 1101 \frac{kg}{m^3} \cdot 20\,380 \frac{J}{kg}$$

$$\Delta H = 2.84 \cdot 10^8 \frac{J}{m^3}$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт теплообміну

Коефіцієнт теплопередачі	
Температура повітря	$T_m = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$
Коефіцієнт теплопередачі	$h = 143 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Робочі температури	
Початкова	$T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Кінцева	$T = -0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$
Продукту	$T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Камери	$T = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Об'ємна питома теплоємність

$$C_s = \rho_s \cdot c_s$$

$$C_s = 1101 \frac{kg}{m^3} \cdot 2093 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$C_s = 2.304 \cdot 10^6 \frac{J}{K \cdot m^3}$$

$$C_1 = \rho_1 \cdot c_1$$

$$C_1 = 988 \frac{kg}{m^3} \cdot 3560 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$C_1 = 3.517 \cdot 10^6 \frac{J}{K \cdot m^3}$$

Час охолодження [27]

$$\theta = \frac{\Delta H}{T_c - T_m} \cdot \left(\frac{P \cdot L}{h} + \frac{R \cdot L^2}{k} \right)$$

$$\theta = \frac{2.84 \cdot 10^8 \frac{J}{m^3}}{[-0.8 - (-33)] K} \cdot \left(\frac{0.591 \cdot 0.025 m}{143 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0.524 \cdot (0.025 m)^2}{0.388 \frac{W}{m \cdot K}} \right)$$

$$\theta = 8356 s \cdot \left(\frac{1 g}{3600 s} \right) = 2.321 g$$

Заморожування має проходити нижче температури скла переходу, щоб утворити жорстку матрицю. Процес починається з швидкого охолодження, часто до -40°C або нижче, залежно від продукту. У цей час кристали льоду зароджуються і ростуть. Розмір цих кристалів впливає на структуру та

кінетику сублімації. Більші кристали льоду утворюються при повільнішому охолодженні, але надзвичайно повільне охолодження може сприяти міграції розчинених речовин. Швидке охолодження може утворювати менші кристали, що покращує швидкість сушіння, але збільшує площу поверхні для сублімації.

Температура відіграє важливу роль у сублімаційному сушінні. Під час фази заморожування температура має бути достатньо низькою, щоб продукт повністю заморозив. Ідеальна температура замерзання залежить від характеру продукту. Для більшості харчової сировини поширена температура -40°C . Під час первинної фази сушіння, коли відбувається сублімація, температуру потрібно ретельно контролювати [14-16]. Нижча температура може уповільнити швидкість сублімації, але також допомогти зберегти якість продукту. У міру первинного сушіння температуру можна поступово підвищувати, щоб прискорити процес, але слід дотримуватися того, щоб не перевищити температуру колапсу продукту. Температура колапсу – це температура при якій структура продукту починає розкладатися.

Оптимізація фази первинного сушіння є критично важливим, оскільки є найдовшим і найенергоємніший етап у всьому циклі сублімаційного сушіння. Оптимізація цього етапу може суттєво підвищити ефективність, скоротити час виробництва та підвищити якість продукції. Первинна фаза сушіння не лише тривала, а й споживає значну частину енергії. Для багатьох харчових продуктів, підтримка суворого теплового профілю є необхідною, щоб уникнути структурної деградації. Однак балансування швидкості сублімації з температурними обмеженнями є складним.

Первинне сушіння зазвичай є найдовшим етапом, займаючи найбільшу частку часу циклу сублімаційного сушіння. Температура та тиск під час первинного сушіння визначають швидкість видалення вологи та температуру продукту. Підвищення температури та тиску прискорить первинний процес сушіння, але це може негативно вплинути на якість продукції. Температура полиці та тиск у камері критично важливі через їхній вплив на теплопередачу, масообмін і температуру продукту, що є найважливішою змінною процесу, навіть якщо не можна контролювати її безпосередньо. Бажано, щоб температура продукту була на безпечну відстань нижче верхньої температурної межі продукту (зазвичай температури колапсу), але не настільки низькою, що це зайво уповільнює процес [14-16]. Первинне сушіння видалає основну частину льоду шляхом сублімації, що вимагає контролю температури полиці, які подають тепло в продукт. Фронт сублімації просувається від верхньої частини замороженого шару до низу продукту. Рушійною силою є різниця тиску пари між льодовим інтерфейсом і камерою. Якщо скорочується первинне сушіння, залишається залишковий лід, що може призвести до неповної сублімації та потенційного мікробного росту. Якщо фаза занадто довга компоненти продукту можуть деградувати через тривале вплив тепла. Системи керування вимірюють температуру продукту за допомогою термопар або бездротових датчиків. Вимірювання спрямоване на коригування для забезпечення оптимальної сублімації.

Температура продукту має залишатися нижчою за температуру колапсу.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Перевищення цього порогу призводить до плавлення або усадки сировини. Тиск є один з важливий параметр. Камера сублімації повинна бути вакуумною для полегшення сублімації. Нижчий тиск дозволяє швидше сублімувати, але потрібно враховувати правильний баланс. Якщо тиск занадто низький це може спричинити проблеми, такі як надмірне закипання продукту. З іншого боку, якщо тиск занадто високий, швидкість сублімації буде повільною. Тривалість кожного етапу процесу сублімаційного сушіння також є критичним параметром. Основна фаза сушіння зазвичай є енергоємною. Потрібно переконатися, що весь лід був сублімований, перш ніж переходити до вторинної фази сушіння [14-16]. Тиск у камері також має залишатися достатньо низьким для полегшення сублімації. Тривалість первинного сушіння залежить від об'єму сировини, геометрії та теплових властивостей матриці. Оптимальна температура та тиск під час первинного сушіння визначаються на основі температури колапсу продукту та можливостей сублімаційної сушильної машини. Оптимальні умови процесу запобігатимуть втраті контролю тиску в камері та підтримуватимуть температуру продукту нижче температури колапсу. Тому температуру первинного сушіння слід підтримувати якомога вищою, але нижче критичної температури процесу, щоб уникнути втрати структури сировини.

Вторинна фаза сушіння використовується для видалення залишкової води, що прилипла до продукту. Час вторинного сушіння залежить від продукту та попередніх умов сушіння. Вторинне сушіння видаляє зв'язану або адсорбовану воду, яка залишилася в висушеній матриці. Фаза зазвичай відбувається при вищих температурах полиці, ніж при первинному сушінні. Десорбція потребує додаткової теплової енергії для розриву взаємодії водяної матриці. Рівень залишкової вологості часто опускається нижче 1%. Якщо не відбувається виділення достатньо вологи, продукту загрожує мікробне розмноження, якщо вологи буде виділено надто багато це може порушити стабільність продукту, змінюючи його структуру. Під час вторинного сушіння рівень вакууму залишається низьким для покращення передачі маси. Ретельний моніторинг є надзвичайно важливим. Будь-яка помилка може зменшити термін придатності продукту.

Вторинне сушіння зазвичай проводять приблизно протягом 1/3 або 1/2 часу, необхідного для первинного сушіння. Загальною практикою при сублімації є підвищення температури полиць під час вторинного сушіння та зниження тиску в камері до найнижчого досяжного рівня [20]. Практика базується на тому, що лід більше не присутній і немає занепокоєння щодо «сліду танення», а продукт може витримувати більший тепловий вплив. Також вода, що залишилася під час вторинного сушіння, міцніше зв'язана, тому для її видалення потрібна більша енергія. Зниження тиску в камері до максимально досяжного вакууму традиційно вважалось сприятливим для десорбції води.

Для оптимізації процесу сублімаційного сушіння необхідно здійснювати моніторинг та контролювати параметри процесу в режимі реального часу. Більшість сучасних сублімаційних сушарок оснащені сучасними системами керування, які дозволяють регулювати температуру, тиск і час [14-16]. Також

можна контролювати процес за допомогою датчиків, які вимірюють температуру, тиск і втрату ваги (рис. 2.1). Спостерігаючи за процесом можете виявити будь-які проблеми на ранньому етапі та внести необхідні коригування. Наприклад, якщо відбувається втрата ваги і процес йде повільніше, ніж очікувалося, можливо, необхідно відрегулювати температуру або тиск, щоб прискорити сублімацію.

Після завершення процесу сублімаційного сушіння важливо правильно виконати постобробку, що може включати, наприклад, запечатування сублімаційного продукту в герметичних контейнерах для запобігання повторному всмоктуванню вологи. Також необхідно зберігати продукти в прохолодному, сухому місці для підтримки їхньої якості. Правильно оптимізовані цикли дають продукти з узгодженою морфологією та стабільною потужністю. Будь-яке відхилення у заморожуванні, первинному чи вторинному сушінні може підірвати ці якісні характеристики.

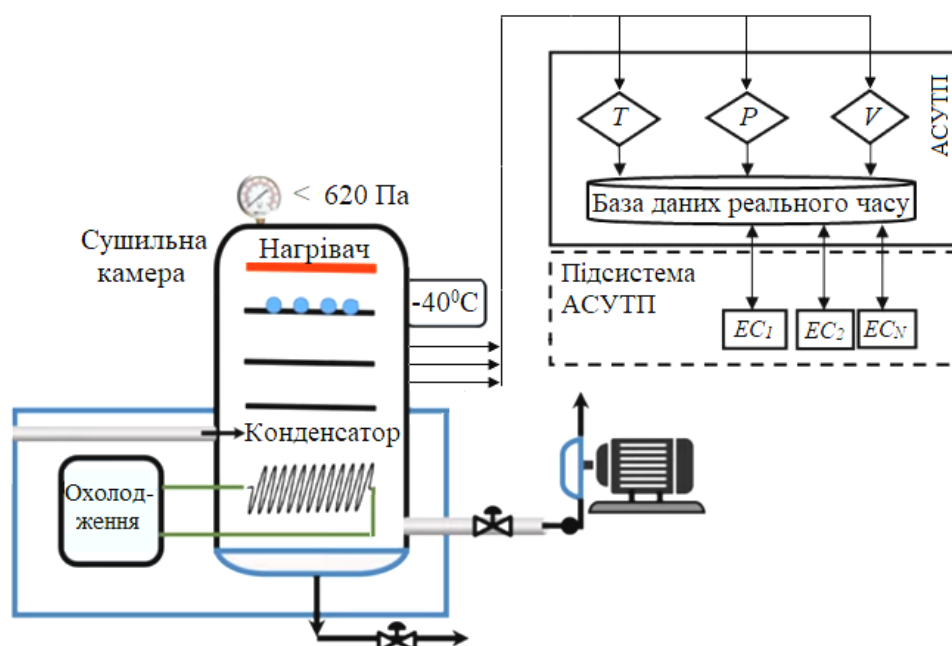


Рисунок 2.1 – Моніторинг та контроль параметрів процесу в режимі реального часу

Первинне та вторинне сушіння є визначають стабільність продукту, властивості відновлення та ефективність виробництва. Їхній зв'язок визначає, наскільки добре продукт зберігає свою структуру та якість. Точні коригування на цих етапах забезпечують стабільні результати та дотримання належних виробничих практик. Первинне сушіння створює основу шляхом видалення вільного льоду шляхом сублімації під зниженим тиском. Оператори ретельно контролюють температуру полиці, утримуючи продукт нижче температури колапсу, щоб уникнути структурної деформації. Якщо температура продукту піднімається вище критичного порогу, матриця може колапсувати. Часто необхідно визначити кінцеву точку первинного сушіння, вимірюючи потік пари або зміну тиску. Оператори регулюють температуру полиці, щоб відповідати швидкості сублімації. Якщо вони занадто скоротять основне сушіння, лід

залишається. Залишки льоду можуть розтанути під час вторинного сушіння, а розтала вода знову зв'язується з продуктом, сприяючи росту мікроорганізмів, що також підвищує залишкову вологість понад допустимі межі.

Вторинне сушіння зосереджене на десорбції зв'язаної води з аморфної матриці. Оператори підвищують температуру полиці але зберігають безпечний запас для запобігання термічній деградації. Цей крок має досягти тонкого балансу. Якщо вони видаляють надто багато води, можуть розкрити чутливі білки. Допоміжні речовини можуть деградувати, що призводить до втрати або агрегації потужності. Надмірне сушіння також може створити крихку структуру торта, яка легко тріскається під час транспортування. Якщо оператори не видаляють достатньо води, залишкова волога прискорює гідроліз, окислення або навіть сприяє росту бактерій.

На основі вище зазначеного можна вважати, що процес сублімації – це складний зв'язок між фізичними та хімічними перетвореннями при цьому основою є первинне та вторинне сушіння. Первинне сушіння фактично видаляє вільну воду шляхом сублімації, утворюючи пористу матрицю, тоді як вторинне сушіння десорбує зв'язану воду, забезпечуючи низький залишковий рівень вологи. Відхилення в будь-якій з фаз можуть погіршити якість продукції, стабільність і відповідність нормативним вимогам. Тому температуру первинного сушіння слід підтримувати якомога вищою але нижче критичної температури процесу, щоб уникнути втрати структури сировини. На відміну від умов первинного сушіння, які використовують низьку температуру полиць і помірний вакуум, вторинне сушіння проводиться з підвищенням температури полиць і зниженням тиску в камері до мінімуму.

Точний контроль температури, тиску та тривалості під час цих фаз є критично важливим. Сучасні інструменти моніторингу та оптимізовані протоколи зменшують ризики, такі як утворення порожнечі або надмірне висихання. Розуміючи механістичний зв'язок між первинним і вторинним сушінням, виробники можуть підвищити ефективність сублімації, забезпечити ефективність продукту та відповідати суворим регуляторним стандартам. Оптимізація процесу сублімаційного сушіння – це багатоетапний процес, що включає попередню обробку, вибір обладнання, оптимізацію параметрів, моніторинг і подальшу обробку. Дотримуючись цих кроків і можна підвищити ефективність і якість сублімаційного сушіння.

2.2 Удосконалення сублімаційної сушарки

Сублімація – це процес під час якого вода видаляється з продукту після його заморожування та розміщення під вакуумом, що дозволяє льоду переходити безпосередньо із твердого стану в пару, минаючи рідку фазу. Процес сублімації проводиться за низької температури та тиску, тому він підходить для сушіння багатьох продуктів харчування. Етапи, що включені в сублімацію починаються з підготовки сировини, що супроводжується заморожуванням, первинним сушінням і вторинним сушінням, щоб отримати кінцевий продукт із бажаним вмістом вологи [6, 8, 20]. Субліматор лоткового

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

типу дозволяє заморожувати продукт та виконувати як первинне (видалення вільної води) так і вторинне (видалення зв'язаної води) тим самим отримуючи максимально сухий кінцевий продукт. Субліматор складається з вакуумної камери, яка містить полиці для продуктів, здатні охолоджувати та нагрівати контейнери та їхній вміст [1-6]. Вакуумний насос, холодильна установка та пов'язані з ними елементи керування підключені до вакуумної камери. Після того як продукт заморожено, вмикається вакуумний насос і продукт нагрівається, а тепло передається через теплопровідність від полиці до продукту.

Заморожування здійснюється за допомогою контактного охолодження – конвективне охолодження через циркуляцію холодного повітря. Потім попередньо заморожений матеріал завантажують у сушарку і обробляють. Продукт рухається у лотках або на стрічках залежно від типу сушарки. Звичайна установка для сублімації характеризується компактною конструкцією, що складається з кількох систем, які виконують різні функції для забезпечення процесу сублімації [5]:

- робоча камера;
- система лотків;
- система нагрівання;
- вакуумна система;
- охолоджувальна система;
- система керування;
- система розморожування.

Вважається за доцільне сублімаційну сушарку розділити на три зони: в нижній частині розташувати підсистему охолодження та вакууму, у середній частині сушильну робочу камеру, всередині якої розташовані система нагрівання, а у верхній частині розташовувати систему керування (рис. 2.2).

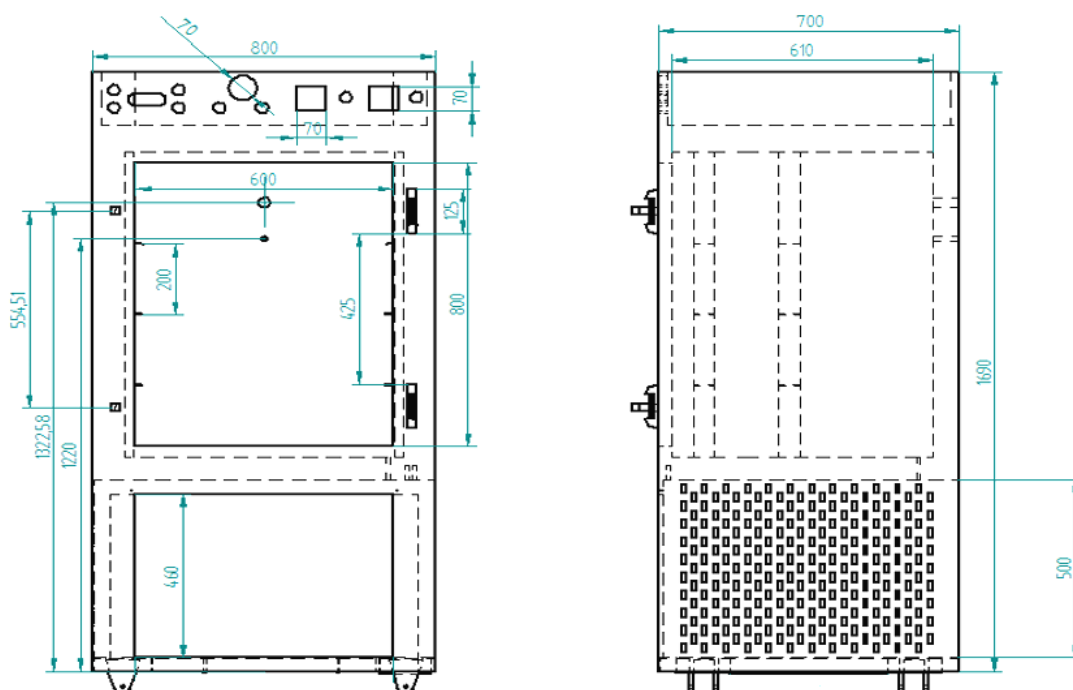


Рисунок 2.2 – Оптимізована конструкція сублімаційної сушарки

Робоча камера – герметичний вакуумний корпус, який іноді називають камерою або шафою для сублімації. Камера містить полиці для обробки продукту, зазвичай виготовляється з нержавіючої сталі, всередині дуже полірована, а зовні ізольована та облицьована, замикання дверей здійснюється за допомогою гідравлічного або електричного двигуна [20]. В нашому обладнанні робоча камера – це простір у якому відбувається процес дегідратації продуктів. У ній розташована система лотків та система нагрівання продуктів і саме там знаходиться випарник, елемент, відповідальний за обмін енергією між холодоагентом та завантаженням, що знаходиться в цьому місці. Камера класифікується за її геометричною конфігурацією та за розташуванням системи конденсації [5]:

За геометричною конфігурацією:

- система з круглою або циліндричною камерою;
- система з прямокутною камерою.

За розташуванням системи конденсації:

- система з однією камерою;
- система з подвійною камерою.

У системі з однокамерним апаратом конденсатор розташований на стінках робочої камери, що робить субліматор трохи компактнішим. Він має систему розморожування гарячою водою для танення шару льоду, що утворюється на стінках конденсатора після завершення процесу сушіння продукту. Пара, яка відведена під вакуумом, спрямовується до стінок камери, оскільки вакуумний канал підключений до боку конденсатора. Система з однією камерою має високу здатність до сушіння та низьке енергоспоживання, її можна використовувати як у великих так і в малих субліматорах. Час сублімації коротший, оскільки конденсатор оточує камеру для випуску продукту [5, 11]. У системі з подвійною камерою камера конденсації відокремлена від камери сушіння, що робить субліматор більшим і зазвичай знаходиться під нею але повинна мати велику секцію для сполучення між ними, щоб уникнути великих різниць тиску. Система значно ефективніша та економічніша у нижній частині камери конденсації є канал для відведення конденсату або дренажу, а у верхній частині – система розморожування і камеру конденсації можна контролювати додатковими дверима. У такого типу камери витягнута пара направляється до камери конденсату, оскільки вакуумний насос підключений до цієї камери.

Камера виконує дві основні функції:

- забезпечення безпечного середовища для продукту протягом всього процесу;
- забезпечення необхідної температури та тиску для проведення кожного етапу процесу.

Система лотків – це відсік у який поміщають продукти, що підлягають процесу сублімації. Температура лотків, а отже, і продукту контролюється термopарами, розташованими стратегічно на певній відстані таким чином, щоб уникнути помилок або великих різниць у температурі, і щоб температура лотка була однорідною. Лотки зазвичай мають лише один дизайн, але залежно від їх

системи передачі тепла до сировини вони мають певні варіації у формі. Конструкція полиці ускладнюється через різні функції, які вона повинна виконувати. Полиця функціонує як теплообмінник, відводячи енергію від продукту під час заморожування та забезпечуючи енергією продукт під час основного та вторинного етапів сушіння у циклі сублімації [5, 20]. Для виробничих цілей обладнання може містити кілька полиць, які виконують кілька функцій: діють як теплообмінник, видаляючи енергію з продукту під час заморожування, і, по-друге, задіяні в постачанні енергії продукту під час первинного та вторинного сушіння та можуть бути [21]:

- плоскими та рівними, щоб забезпечити належний контакт з контейнерами для продуктів;
- сконструйованими таким чином, щоб були достатньо міцними для підтримки рівної поверхні;
- достатньо міцними, щоб витримувати сили системи закривання.

Обрано варіант з простої квадратною камерою з відділенням для 3 лотків для розташування продуктів та системою нагрівання за допомогою резисторів, встановлених у прямому контакті з підставками для лотків.

Система нагрівання лотків використовується для випаровування або вторинне сушіння. Система починає свою роботу в момент, коли система управління виявляє потрібну температуру та тиск. Система класифікується відповідно до джерела тепла таким чином [4, 5]:

- система нагрівання за допомогою електричних резисторів;
- система нагрівання за допомогою нагрівальної рідини.

Система нагрівання за допомогою електричних резисторів, у свою чергу, поділяється на чотири типи залежно від способу нагрівання продукту:

- нагрівання прямим контактом;
- нагрівання прискореною системою;
- нагрівання за допомогою випромінювання;
- діелектричне нагрівання та нагрівання за допомогою мікрохвиль.

При нагрівання прямим контактом продукти розміщуються у розділених контейнерах, які стоять на нагрівальних плитах. У таких установках сублімація відбувається повільніше, оскільки тепло передається за допомогою теплопровідності лише через одну сторону продукту. Контакт між продуктом, що заморожується, і нагрівальною поверхнею нерівномірний, що зменшує швидкість теплопередачі [4, 5, 13]. З іншого боку, також відбувається падіння тиску в масі продукту, що викликає різницю у швидкості сублімації верхнього та нижнього шару. Під час прискореного нагрівання системою між продуктом і нагрівальними пластинами знаходиться металева сітка, що забезпечує швидшу передачу тепла, ніж через суцільні плити, і дозволяє пару легше видалятися з поверхні продукту, що скорочує час сублімації.

При нагрівання шляхом випромінювання сировину розподілену на підносах у тонких шарах нагрівають випромінюванням. Система нагрівання більш рівномірною, ніж при теплопередачі через провідність, оскільки нерівності поверхні матеріалу тут менше впливають на швидкість теплопередачі [4, 5, 13]. У масі продукту не відбувається зниження тиску, тому умови сублімації зберігаються постійні. Діелектричний та мікрохвильовий нагрів. Діелектричні

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та мікрохвильові нагрівачі мають потенційне застосування у сублімації, проте наразі вони не використовувалися для цієї мети на промислових установках. Сублімація за допомогою мікрохвиль є процесом важким для контролю, оскільки коефіцієнт втрат води вищий, ніж у льоду, і якщо в якійсь точці продукту вона розтане, це спричинить ланцюгову реакцію перегріву. Система нагрівання за допомогою теплоносія забезпечує нагрівання лотків за прямим контактом. Джерелом тепла є добре розподілений по всьому тримачу лотків зміювик, який містить рідину, що проходить повний цикл через усі лотки і повертається до початкової точки, якою є нагрівальний елемент, що попередньо нагріває рідину перед початком її руху. Система значно менш ефективна, оскільки лотки не будуть мати однакову температуру через втрати тепла при проходженні від одного лотка до іншого, що призводить до нерівномірної теплопередачі і продукти не виходять при однакових умовах.

Система нагрівання відповідає за виділення вологи з продукту у вигляді пари. Після того як продукт був доведений до температури -35°C , а в робочій камері тиск знижено до вакуумного рівня потрібно почати подавати тепло на продукт через нагрівальні елементи. У наступній фазі підтримується достатньо високий вакуум і контролюється тепло таким чином, щоб його інтенсивність була трохи меншою, ніж та, що потрібна для танення льоду, так що, у міру продовження процесу, межа льоду поступово відступає до центру продукту, тобто продукт зневоднюється від поверхні до середини. На цій фазі продукт сублімується до вмісту води 15% (відносно його вологої маси) [4, 5]. Останній етап сушіння починається, коли лід у продукті вичерпаний, а волога походить з частково зв'язаної води в матеріалі, що сушиться. Обладнання підтримується під низьким тиском, а температура підвищується до значення, близького до температури навколишнього середовища, сублімація продовжується і фронт сублімації переміщується всередину продукту. Водяна пара виходить з продукту через канали, утворені сублімацією льоду. На цьому етапі вміст вологи в продукті зменшується до 2% (відносно його вологої маси).

Обладнання розраховано на 10 кг продукту як максимальне навантаження для субліматора. Обрано варіант з квадратною камерою з відділенням для 3 лотків та системою нагрівання за допомогою резисторів, встановлених у прямому контакті з підставками для лотків (рис. 2.3). Нагрівальні резистори виготовлялися відповідно до розмірів підносів і з урахуванням того, що температура продукту не повинна перевищувати 60°C при якій почне танути лід. Підноси виготовлені у вигляді ребристої конструкції, щоб забезпечити проходження пари, що виділяється з продуктів, оскільки нагрівальні елементи будуть встановлені під конструкцією підносів, що дозволяє визначити загальну довжину нагрівального елемента. Система нагрівання складається з трьох ребристих піддонних пластин з трьома резисторами по 60 Вт на 220 В.

Запропоновано об'єднати сушильну систему та систему нагрівання в сублімаційній сушарці, бо у сублімаційному сушінні нагрівання є невід'ємною частиною самого процесу висушування, оскільки для переходу льоду в пару (сублімація) необхідне безперервно підводити тепло. Система нагрівання

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

складалася з трьох лоткових плит на які будуть встановлені нагрівальні елементи резистори, що контролюватимуться, щоб температура продукту не перевищувала 60°C для того щоб процедура виділення пари була повільною. Полиці одночасно будуть і місцем висушування і джерелом тепла (полиці з терморегуляцією).

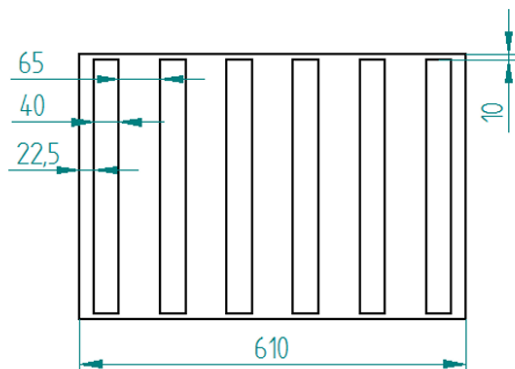


Рисунок 2.3 – Система нагрівання за допомогою резисторів

Продукт, який буде висушуватися методом сублімації або заморожується перед потраплянням у сушарку або заморожується прямо на полицях. Для цього потрібна значна кількість енергії. Охолоджуючу енергію забезпечують компресори або іноді рідкий азот. Найчастіше потрібні кілька компресорів і компресор може виконувати дві функції: одну для охолодження полиць, а другу для охолодження процесного конденсатора. Система охолодження є звичайною системою, що складається з компресора, конденсатора, випарника та дросельного клапана [5, 20]. У промислових субліматорах задіяні системи охолодження з двоступеневим стисненням, щоб досягти необхідних температур, залежно також від продукту, що підлягає сублімації і включають компоненти, які забезпечують більш точний, якісний та гігієнічний процес. Система охолодження повинна мати здатність охолоджувати продукт для сублімації до температури приблизно -40°C і підтримувати цю температуру, поки не буде досягнуто повного видалення водяної пари за допомогою вакуумного насоса.

Система охолодження відіграє фундаментальну роль у процесі сублімації, оскільки вона відповідає за виконання першого етапу процесу, який полягає у доведенні продукту до температури нижче -35°C . Вибір випарника є одним із найважливіших етапів, оскільки через нього відводиться необхідне тепло з продукту для проведення процесу сублімації. Тип випарника, який слід обрати та його поверхнева площа відіграють надзвичайно важливу роль у виборі, тому через обмежений простір і специфіку застосування було необхідно обрати ребристий випарник, який не займає багато місця та забезпечує оптимальну продуктивність для низькотемпературних застосувань [5]. Для субліматора було визначено систему охолодження з використанням ребристого випарника, оскільки це забезпечує більшу ефективність, адже необхідно досягти дуже низької температури у дуже малій камері. Процес має бути безперервним для повного видалення вологи з продукту, тому система охолодження не може працювати за методом плити, тобто за допомогою труб, встановлених у

прямому контакті зі стінами камери. Одним із найважливіших факторів при виборі випарника є робочий перепад температури випарника, який визначається як різниця між температурою повітря на вході до випарника, прийнятою як розрахункова температура камери та температурою випаровування холодоагенту при тиску на виході з випарника.

Основна функція конденсаторної камери полягає в розміщенні конденсаторної поверхні для видалення води під час процесу сушіння. Вона складається з котушок або пластин, які охолоджуються шляхом прямого розширення холодоагенту. Існують фізично два типи конденсаторів: один – «внутрішній конденсатор», який розташований у сушильній камері і другий – «зовнішній конденсатор», який розміщений за камерою.

Запропоновано розділити сушильну камеру та конденсатор в сублімаційній сушарці, що забезпечить двокамерне рішення (виносний конденсатор):

- попереджує ризик потрапляння льоду чи конденсату назад на сировину;
- дозволяє вимикати конденсатор для очищення від льоду, не нагріваючи сам продукт у сушильній камері;
- наявність ізоляційного клапана між камерами дозволяє точно контролювати кінець сушіння.

Вакуумна система разом із конденсаторною системою забезпечує необхідний тиск для проведення процесів первинної та вторинної сушки. Низький тиск досягається двоступеневим ротаційним вакуумним насосом, але для великих камер можуть використовуватися кілька вакуумних насосів. Вакуумні насоси, які використовуються в субліматорах є або механічно змащеними маслом, або безмасляними. Вони стискають неконденсовані гази, які проходять через камеру конденсатора і виводять ці гази безпосередньо в атмосферу. Вакуумна система призначена для видалення пари, що міститься в продукті для сублімації [5, 21]. Складається з вакуумного насоса, який у деяких промислових субліматорах є двоступеневим але використовуються і одноступінчасті вакуумні системи. Зазвичай використовуваний вакуумний насос – це ротаційний лопатевий насос, який підключається безпосередньо до конденсаційної камери для всмоктування водяної пари з продукту, що висихає і подання її в конденсатор для видалення у рідкій формі. Вакуумний насос активується, коли температура в робочій камері опускається нижче -40°C .

У процесі сублімації, як тільки вдається підтримувати замороження продуктів нижче -35°C , необхідно досягти вакуумного тиску в камері 610 Па, щоб розпочати процес видалення вологи з продуктів. Для цього було проведено вибір вакуумного насоса, прагнучи знизити тиск за короткий час, щоб не відбулося підвищення температури всередині камери через безперервне виведення холодного повітря назовні. Ротаційні лопаткові вакуумні насоси спеціально розроблені для використання як попередні насоси у середніх та високих вакуумних застосуваннях, призначені для великих витрат насоса в складних умовах роботи [18, 19, 21]. Необхідно враховувати, що для запобігання витокам у камері має бути застосовано ущільнення зі скловолокна у всіх з'єднаннях внутрішньої конструкції стінок та у отворах для входу труб,

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

крім того, дверцята має магнітне ущільнення та подвійний запобіжний ручку, але в будь-якому випадку майже неможливо досягти повної герметичності, з цієї причини, навіть якщо йдеться про невелику камеру, слід враховувати неефективність, що виникає через внутрішні витоки. Згідно з технічними даними було обрано вакуумний насос, що дасть достатню продуктивність, перевищуючи втрати через витоки.

У процесі сублімації найважливішим для ефективного виробництва є наявність точного контролю та здатність досягати відтворюваних результатів. Необхідні елементи керування: температура полиці, тиск і час. Програма керування встановлюватиме ці значення відповідно до вимог продукту або процесу. Час може варіюватися від кількох годин до кількох днів. Інші дані, такі як температура продукту та температура процесного конденсатора, також можна записувати та фіксувати [5, 20]. Втрата продуктів може становити значну цінність, тому використовуються різні елементи контролю, такі як програмовані логічні контролери, кольоровий сенсорний дисплей для вибору, а також для забезпечення зручного інтерфейсу для користувача для моніторингу подій. Для більшої точності даних, отриманих процесором, використовуються високоякісні датчики або вимірювачі як тиску, так і температури та вологості, які розташовані по всій системі і за їх допомогою можна отримувати точні дані про температури продукту, лотків, камери, а також про вакуумний тиск, час процесу та інше.

Для контролю процесу обладнання повинен бути контролер для системи охолодження та ще два окремі контролери температури для нагрівальних елементів і для продукту, що дозволяє здійснювати повний моніторинг процесу та вивчення розвитку дегідратії продуктів. Система нагрівання складатиметься з трьох лоткових плит на які будуть встановлені нагрівальні елементи, що контролюватимуться таким чином, щоб температура продукту не перевищувала 60°C, для того щоб процедура виділення пари має бути повільним і ніколи не відбуватися в рідкому стані [5]. Важливо вимірювати температуру та тиск протягом усього процесу. Контрольованими параметрами є температура полиці та тиск у камері, тоді як температура продукту та температура конденсатора повинні вимірюватися протягом усього процесу. Для вимірювання температури використовуються термометри опору або термопари тоді як датчики вакууму або тиску включають ємнісні манометри, термоелектричні або приладові газові манометри.

Система розморожування може здійснюватися трьома методами [4, 5]:

- розморожування гарячою рідиною;
- розморожування парою води;
- розморожування гарячим газом.

Система нагрівання використовує бак з водою, який перед тим, як потрапити в конденсатор, попередньо заморожений до максимальної ємності, нагрівається за допомогою нагрівального елемента до майже 100°C. Гаряча вода потрапляє на верхню частину камери конденсації і падає під дією сили тяжіння, обпилюючи трубки, покриті льодом, попередньо отриманим із сублімаційного продукту. Вода, що падає, циркулює і знову повертається в бак

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для подальшого використання [11-13]. Система економічна але мало використовується на промисловому рівні. Система обігріву використовує водяну пару, яка зберігається у баку та попередньо нагрівається за допомогою нагрівального елементу, що піднімає температуру води вище 100°C. Вона застосовується для будь-яких конфігурацій як геометричних так і розташування системи конденсації. Відмінність від попередньої системи полягає в тому, що бак для зберігання води розташований у нижній частині конденсаційної камери, а пара під тиском піднімається для розморожування неактивної камери, тоді як з іншого боку клапан закритий, і інша камера замерзає.

Розморожування гарячим газом має багато варіантів усі з яких у тій чи іншій формі використовують як джерело тепла гарячий газ, що виходить із компресора для розморожування випарника. Система передбачає встановлення електромагнітного клапана на обвідній трубі, яку монтують між виходом компресора і випарником. Коли електромагнітний клапан відкритий, гарячий газ із виходу комплексу. Розморожування відбувається в міру того, як гарячий газ передає своє тепло холодному випарнику і конденсується в рідкий стан. Частина конденсованого холодоного агента залишається у випарнику, тоді як решта повертається до компресора, де випаровується від тепла стиску і циркулює назад у випарник [11-13]. Метод розморожування має декілька недоліків, оскільки рідина не випаровується у випарнику під час циклу розморожування, і кількість газу, доступного в компресорі, буде дуже обмеженою. У процесі розморожування більше рідини залишається у випарнику і менше холодоагенту повертається до компресора для повторної циркуляції, в результаті чого система має тенденцію виснажувати тепло до того, як випарник повністю розмерзнеться. Ще одним недоліком цього методу є можливість того, що важкий шар рідкого холодоагенту повернеться до компресора.

На основі вище зазначеного можна вважати, що процес сублімації – це складний зв'язок між фізичними та хімічними перетвореннями при цьому основою є первинне та вторинне сушіння. Первинне сушіння фактично видаляє вільну воду шляхом сублімації, утворюючи пористу матрицю, тоді як вторинне сушіння десорбує зв'язану воду, забезпечуючи низький залишковий рівень вологості. Відхилення в будь-якій з фаз можуть погіршити якість продукції, стабільність і відповідність нормативним вимогам. Тому температуру первинного сушіння слід підтримувати якомога вищою, але нижче критичної температури процесу, щоб уникнути втрати структури сировини. На відміну від умов первинного сушіння, які використовують низьку температуру полиць і помірний вакуум, вторинне сушіння проводиться з підвищенням температури полиць і зниженням тиску в камері до мінімуму.

Запропоновано систему моніторингу та контролю параметрів процесу в режимі реального часу для контролю основних параметрів первинного та вторинного сушіння. Точний контроль температури, тиску та тривалості під час цих фаз є критично важливим. Сучасні інструменти моніторингу та оптимізовані протоколи зменшують ризики, такі як утворення порожнечі або надмірне висихання. Розуміючи механістичний зв'язок між первинним і

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вторинним сушінням, виробники можуть підвищити ефективність сублімації, забезпечити ефективність продукту та відповідати суворим регуляторним стандартам. Оптимізація процесу сублімаційного сушіння – це багатоетапний процес, що включає попередню обробку, вибір обладнання, оптимізацію параметрів, моніторинг і подальшу обробку. Дотримуючись цих кроків і можна підвищити ефективність і якість сублімаційного сушіння.

Оптимізовано сублімаційну сушарку: у нижній частині розташована підсистема охолодження та вакууму, у середній частині знаходиться сушильна робоча камера, всередині якої розташовані система нагрівання, а у верхній частині розташована зона системи керування.

Запропоновано наступні конструктивні оптимізації сублімаційної сушарки:

Об'єднати сушильну систему та систему нагрівання в сублімаційній сушарці, бо у сублімаційному сушінні нагрівання є невід'ємною частиною самого процесу висушування, оскільки для переходу льоду в пару (сублімація) необхідне безперервно підводити тепло. Запропоновано, щоб система нагрівання складалася з трьох лоткових плит на які будуть встановлені нагрівальні елементи резистори, що контролюватимуться, щоб температура продукту не перевищувала 60°C для того щоб процедура виділення пари була повільною. Полиці одночасно будуть і місцем висушування і джерелом тепла (полиці з терморегуляцію).

Розділити сушильну камеру та конденсатор в сублімаційній сушарці, що забезпечить двокамерне рішення (виносний конденсатор):

- попереджує ризик потрапляння льоду чи конденсату назад на сировину;
- дозволяє вимикати конденсатор для очищення від льоду, не нагріваючи сам продукт у сушильній камері;
- наявність ізоляційного клапана між камерами дозволяє точно контролювати кінець сушіння.

Основна функція конденсаторної камери полягає в розміщенні конденсаторної поверхні для видалення води під час процесу сушіння. Вона складається з пластин, які охолоджуються шляхом прямого розширення холодоагенту.

Включення системи розморожування встановивши електричні резистори, які працюватимуть лише наприкінці процесу видалення вологи з продукту.

Вакуумна система разом із конденсаторною системою забезпечує необхідний тиск для проведення процесів первинної та вторинної сушки. Низький тиск досягається двоступеневим ротаційним вакуумним насосом.

Охолоджувальна система відіграє фундаментальну роль у процесі сублімації, оскільки вона відповідає за виконання першого етапу процесу, який полягає у доведенні продукту до температури нижче -35°C. У сублімаційній сушарці є два різні контури охолодження, які виконують різні функції: випарник охолоджує полиці з продуктом для заморожування, а конденсатор збирає на собі вологу, що випаровується з сировини в умовах вакууму. Для субліматора було визначено систему охолодження з використанням ребристого випарника, оскільки це забезпечує більшу ефективність для збільшення площі теплообміну.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вплив сублімації на фізичні властивості сировини

Субліюзаційне сушіння – це процес, який передбачає заморожування речовини для вилучення рідини, що міститься шляхом сублімації. Сублімаційне сушіння впливає на харчові, фізичні та хімічні властивості фруктів і овочів. Конкретні ефекти залежать як від властивостей продукту, так і від зовнішніх параметрів обробки. Сублімаційне сушіння зберігає загальний вміст фенольних сполук, вміст вітаміну С, структуру, колір та інші якості фруктів і овочів у більшій мірі порівняно з традиційними методами термічної дегідратації. Обмеження сублімаційного сушіння включає тривалий час виробництва та високе енергоспоживання, можна зменшити за допомогою попередньої обробки або комбінованих методів сушіння.

На відміну від традиційних процесів сушіння для довшого збереження сировини, які через високі температури можуть спричинити фізичні та хімічні зміни, а також смак чи текстуру, щоб зробити її менш апетитною або навіть неїстівною, процес сублімаційного сушіння, що включає заморожування та сублімацію, не лише збільшує термін зберігання продуктів, а й також зберігає свою форму і об'єм, а також поживні речовини та органолептичні властивості. Сублімаційні продукти зберігають свою поживну цінність до 95%, а також зберігають органолептичні властивості. Метод не змінює фізико-хімічну структуру сировини, тому її можна зберігати без необхідності контролю, а низький вміст вологи забезпечує їжу чудову мікробіологічну стабільність. Процес не лише збільшує термін зберігання продукту, а й зберігає його форму та об'єм, а також поживні речовини та органолептичні властивості. Переваги сублімаційного сушіння [7, 11, 24]:

- зберігає смак, колір, запах і текстуру сировини;
- зберігаються поживні властивості: вітаміни, мінерали, білки;
- не шкодить теплочутливим продуктам, оскільки це робиться при низьких температурах;
- сировину можна швидко зволожувати;
- оскільки сировина буде попередньо підготовлена її можна швидко підготувати до споживання;
- сублімаційна сировина зберігається набагато довше.

Стискання – це деформації об'єму сировини, такої як фрукти, овочі та інші харчові продукти під час процесу сушіння. Швидкість сушіння фруктів та овочів головним чином залежить від коефіцієнта дифузії, який базується на сушінні, а коефіцієнт дифузії впливає на стискання. Деформація або зменшення об'єму майже дорівнює об'єму видаленої рідкої води, якщо сировина

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Ларін</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Омельченко</i>					38	5
						ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Цвіркун</i>						

піддається ідеальному стисканню. Фрукти та овочі під час сушіння розвивають дуже високий градієнт вологості, що призводить до утворення кірки. Під час сушіння поверхня матеріалу спочатку переходить у склоподібну фазу, утримуючи матеріал вологим і гумовим ближче до центру. Таким чином, зовнішня поверхня сировини стає твердою, що зменшує об'єм і обмежує видалення води. Стискання впливає на текстурні властивості сушених фруктів та овочів, оскільки його вважають важливим параметром якості для споживачів.

Текстурні характеристики мають велике значення при визначенні загальної якості фруктів та овочів. Погіршення якості під час процесу сушіння є важливою причиною через зміни текстурних властивостей фруктів та овочів. Текстурні властивості, які включають хрускість, крихкість, волокнистість, твердість, ніжність тощо вимірюються шляхом прикладання сили до продуктів. Фрукти та овочі під час процесу сушіння зазнають колапсу структури, що призводить до більш щільних текстур [25]. Під час сушіння відбувається накопичення внутрішніх напружень через желатинізацію крохмалю, кристалізацію целюлози, розкладання пектину та локальні відмінності у вологості, що призводить до пошкодження та руйнування жорстких клітин. Ця втрата текстури змушує харчовий матеріал виглядати зморщеним і скороченим та є причиною варіацій у якості текстури висушених продуктів.

Колір – найважливіша характеристика якості сушених продуктів, яка безпосередньо пов'язана з прийнятністю для споживача. Під час сушіння багато хімічних та біохімічних реакцій можуть змінювати колір фруктів і овочів і ця проблема пов'язана із методом сушінням. Ферментативне потемніння є важливою біохімічною реакцією у фруктах та овочах, яка негативно впливає на кілька показників якості, таких як колір, аромат, смак та поживні речовини [25]. Смак – важливий для сприйняття споживачем, це поєднання смаку та аромату, де смак описує рівновагу між кислотністю та кислинкою за незначної терпкості, тоді як аромат визначають летючі компоненти продукту. Однак, загалом, смак переважно визначається ароматом. Будь-яке дослідження смаку фруктів та овочів має включати як летючі, так і нелетючі компоненти, які разом формують характерний смак.

3.2 Оцінка якості висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом

Альтернативою класичним методам сушіння є сублімація – технологія, яка базується на дегідратації в умовах вакууму матеріалу, що попередньо заморожений, шляхом сублімації льоду. Процес здійснюється при низьких температурах. Сублімація є найкращим методом видалення води для отримання продуктів найвищої якості у порівнянні з іншими методами дегідратації. Сублімація – це процес, при якому продукт спочатку заморожується, а потім лід, утворений при заморожуванні видаляється шляхом сублімації, зазвичай у умовах низького тиску та температура. Сублімація призводить до утворення сухого пористого шару, який постійно видаляється під час процесу. Процес

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сублімаційного сушіння використовується з метою зменшення втрат летких або термочутливих компонентів. Сушінні отримані продукти не втрачають своїх властивостей і легко регідратуються.

Банан – одна з найважливіших культур у світі, яка містить широкий спектр цінних сполук і має цікаві функціональні властивості. Банани дуже швидко псуються через високий вміст вологості, тому відповідні технології мають продовжити термін їх зберігання. Сушіння є важливим і широко використовуваним методом харчової обробки. Якість сушеного банану значною мірою залежить від способу сушіння та умов сушіння. Проте збереження бананових скибочок має певні труднощі, оскільки вони швидко набувають мідного відтінку внаслідок дії ферментів. Як альтернативу споживанню у свіжому вигляді існують процеси, яким їх можна піддавати, що дозволяє мати фрукти протягом усього року із збереженням оптимальної харчової та сенсорної якості. Сублімацію можна розглядати, як альтернативний метод збереження продуктів харчування, що дозволяє продовжити строк придатності, значно зберігаючи фізичні та фізико-хімічні властивості, пов’язані з їх якістю. Задля цього здійснено оцінка якості отриманих висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом.

Процес сушіння бананів методом сублімації. Зразки бананів були відповідно до технології підготовлено, нарізали на скибочки і сублімували в обладнанні, яке працює за параметрами -40°C та рівнем вакууму 63 Па, процес тривав 24 години (рис. 3.1).

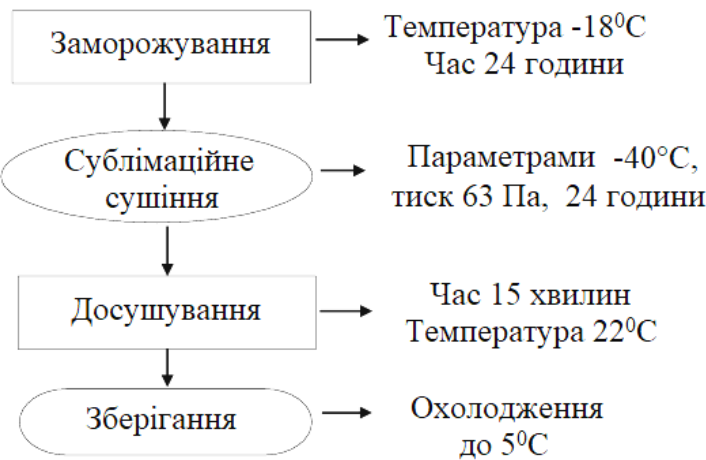


Рисунок 3.1 – Процес сушіння бананів методом сублімації

Колір є критичним фактором, який слід враховувати у зневоднених продуктах, оскільки він розглядається як показник якості продукту. Зміни кольору фруктів можуть бути спричинені деградацією кольорових пігментів, ферментованим потемнінням або окисленням вітаміну С. Метод сушіння значно впливає на параметри кольору сушених фруктів. Сушені методом сублімації банани показали деяке підвищення яскравості, а жовтизна залишалася стабільною або трохи підвищеною порівняно зі свіжими зразками бананів. Значення параметрів для отриманих сушених сублімацією бананів (L* = 63, a* = 6,8, b* = 22) не відрізнялися значущо від значень свіжих бананів (L* = 64, a* = 7, b* = 22), що свідчить про максимальне збереження кольору у

процесі сушіння. У порівнянні з традиційними методами сушіння сублімація також сприяє меншому погіршенню кольору фруктів (рис. 3.2).

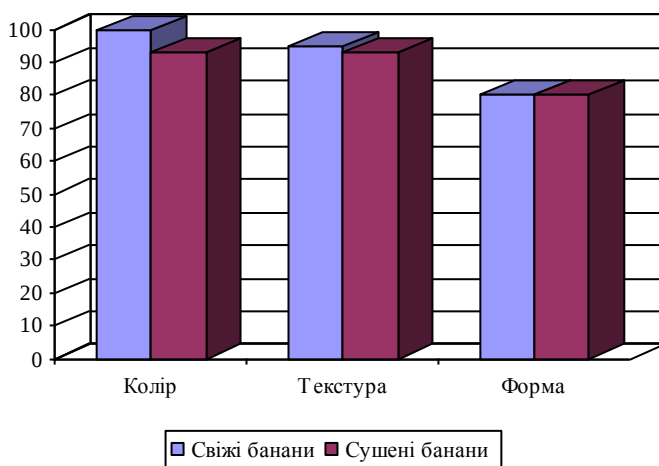


Рисунок 3.2 – Порівняння критеріїв якості бананів (свіжих та висушених за допомогою сублімаційного сушіння)

Процес сушіння бананів гарячим конвективним повітрям. Конвекційні та сушарки становлять основу більшості промислових сушильних операцій. Вони надійні, перевірені і дивовижно універсальні для роботи з багатьма видами харчової сировини. Сушіння гарячим повітрям домінує в категорії конвекції, бо воно просто працює. Гаряче повітря циркулює навколо сировини поглинаючи вологу. Сушарки забезпечують точний контроль температури, що ідеально підходить для деякої харчової сировини, де термічне пошкодження є серйозною проблемою. Сушіння гарячим повітрям є одним із найбільш поширених промислових методів збереження фруктів завдяки своїй низькій вартості та простій технології. Зазвичай використовують температури понад 60°C протягом тривалого часу, що призводить до високих витрат і зниження комерційної якості кінцевого продукту (зміни форми та текстури продукту, смаку та аромат, зміна кольору, поживних компонентів). Підготовлені шматочки бананів піддавалися конвективному сушінню на лотках за таких параметрів температури: від 75 до 80°C протягом 8 годин.

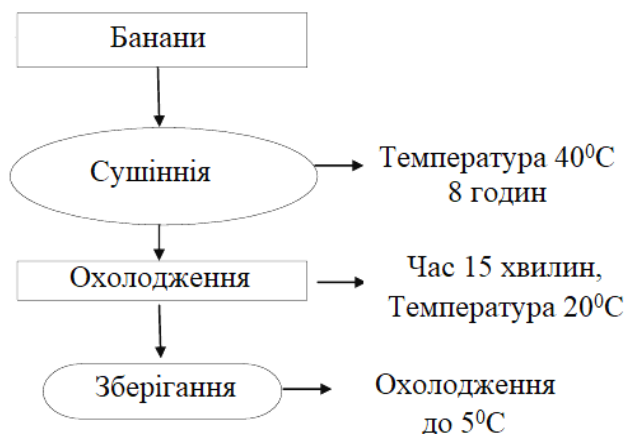


Рисунок 3.3 – Процес сушіння бананів конвекційним методом

Із отриманих зразків можна дійти висновку, що метод конвекційного сушіння не підходить до обробки бананів. Відбувається руйнування структури – це небажана структурна зміна, яка відбувається, коли в'язкість продукту зменшується при підвищенні температури. В'язкість твердого матеріалу більше не може підтримувати власну структуру, що призводить до руйнування, стискання та до втрати мікроскопічної структури. Такі продукти з руйнованою структурою мають зменшений аромат і знижені можливості повторного зволоження. Руйнування також можна визначити як зменшення об'єму або збільшення видимої питомої щільності (рис. 3.4). Висока температура сушіння може негативно впливати на вологість та в'язкість продукту, що призводить до швидкої втрати структурної цілісності або колапсу. Низька температура не викликає помітного стиснення у сировині, висушених методом заморожування.

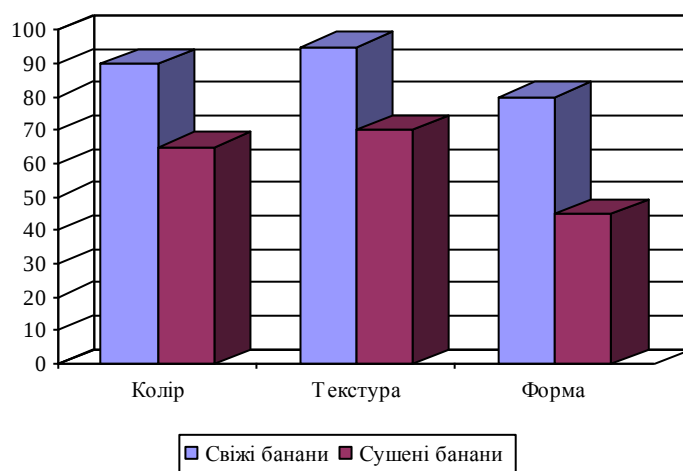


Рисунок 3.4 – Порівняння критеріїв якості бананів (свіжих та висушених за допомогою конвективного сушіння)

На основі вище зазначеного можна вважати, що методи сушіння впливають на властивості фруктів і овочів. Задля цього було здійснено оцінку якості отриманих висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом. Сушені методом сублімації банани показали деяке підвищення яскравості, а жовтизна залишалася стабільною або трохи підвищеною порівняно зі свіжими зразками бананів. Значення параметрів для отриманих сушених сублімацією бананів ($L^* = 63$, $a^* = 6,8$, $b^* = 22$) не відрізнялися значно від значень свіжих бананів ($L^* = 64$, $a^* = 7$, $b^* = 22$), що свідчить про максимальне збереження кольору у процесі сушіння. Низька температура не викликає помітного стиснення та втрати об'єму в сировині.

Конвективне сушіння через високі температури спричинило фізичні та хімічні зміни, а також руйнування текстури. Висока температура сушіння негативно вплинула на вологість та в'язкість продукту, що призвело до швидкої втрати структурної цілісності сировини. Сублімаційне сушіння не лише збільшує термін зберігання продуктів, а й також сприяє зберіганню форми і об'єму бананів. У порівнянні з традиційними методами сушіння сублімація сприяє меншому погіршенню кольору бананів, що є одним з важливих параметрів сушіння.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах. У роботі зазначено, що на сьогоднішній день методи збереження продуктів харчування, засновані на процесі зневоднення, використовуються харчовою промисловістю протягом тривалого часу з метою продовження терміну придатності. Проте тепло може змінювати органолептичні характеристики та впливати на втрату поживних харчових цінностей. Альтернативою класичним методам сушіння є сублімація – технологія, яка базується на дегідратації в умовах вакууму матеріалу, що попередньо заморожений, шляхом сублімації льоду, процес здійснюється при низьких температурах. Сублімація є найкращим методом видалення води для отримання продуктів найвищої якості у порівнянні з іншими методами дегідратації.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для сушіння харчової сировини. Зазначено, що сублімаційне сушіння – це метод видалення води шляхом сублімації кристалів льоду з замороженого матеріалу, що використовується в харчовій промисловості з метою стабілізації та збереження продуктів, зменшуючи втрату нестійких сполук. Процес складається із попереднього заморожування продукту, а потім висушування під низьким тиском, яке проходить у два етапи: первинне сушіння або етап сублімації замерзлої води та вторинне сушіння або випаровування незамерзлої води. Обидва етапи сушіння зазвичай проводяться при низькому тиску, що дозволяє в обох випадках змінювати стан води при низьких температурах.

Аналіз наукових джерел сприяв узагальненню класифікації низькотемпературного обладнання. Субліматори бувають періодичної та безперервної дії. Зазначено, що існує три категорії субліматорів: колекторний, ротаційний та субліматор у вигляді лотка. Два компоненти є спільними для всіх типів субліматорів: вакуумний насос для зниження тиску газу в резервуарі, що містить речовину для сушіння та конденсатор для видалення вологи шляхом конденсації на охолодженій поверхні до -40 до -80°C .

Другий розділ присвячено удосконаленню конструкційно-технологічних параметрів сублімаційної сушарки. Зазначено, що відхилення в будь-якій з фаз можуть погіршити якість продукції, стабільність і відповідність нормативним вимогам. Тому температуру первинного сушіння та вторинного сушіння потрібно контролювати. Запропоновано систему моніторингу та контролю параметрів процесу в режимі реального часу для контролю основних параметрів первинного та вторинного сушіння.

Оптимізовано сублімаційну сушарку: у нижній частині розташована підсистема охолодження та вакууму, у середній частині знаходиться сушильна робоча камера, всередині якої розташовані система нагрівання, а у верхній

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Ларін			Удосконалення обладнання для сушіння харчової сировини при низьких температурах				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Омельченко									43	2
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Цвіркун										

частині розташована зона системи керування. Запропоновано наступні конструктивні оптимізації сублімаційної сушарки:

Об'єднати сушильну систему та систему нагрівання в сублімаційній сушарці, бо у сублімаційному сушінні нагрівання є невід'ємною частиною самого процесу висушування, оскільки для переходу льоду в пару (сублімація) необхідне безперервно підводити тепло. Запропоновано, щоб система нагрівання складалася з трьох лоткових плит на які будуть встановлені нагрівальні елементи резистори, що контролюватимуться, щоб температура продукту не перевищувала 60°C для того щоб процедура виділення пари була повільною. Полиці одночасно будуть і місцем висушування і джерелом тепла (полиці з терморегуляцію).

Розділити сушильну камеру та конденсатор в сублімаційній сушарці, що забезпечить двокамерне рішення (виносний конденсатор):

- попереджує ризик потрапляння льоду чи конденсату назад на сировину;
- дозволяє вимикати конденсатор для очищення від льоду, не нагріваючи сам продукт у сушильній камері;
- наявність ізоляційного клапана між камерами дозволяє точно контролювати кінець сушіння.

Основна функція конденсаторної камери полягає в розміщенні конденсаторної поверхні для видалення води під час процесу сушіння. Вона складається з пластин, які охолоджуються шляхом прямого розширення холодоагенту.

Включення системи розморожування встановивши електричні резистори, які працюватимуть лише наприкінці процесу видалення вологості з продукту.

Вакуумна система забезпечує необхідний тиск для проведення процесів первинної та вторинної сушки. Низький тиск досягається двоступеневим ротаційним вакуумним насосом.

Охолоджувальна система відіграє фундаментальну роль у процесі сублімації, оскільки вона відповідає за виконання першого етапу процесу, який полягає у доведенні продукту до температури нижче -35°C. У сублімаційній сушарці є два різні контури охолодження, які виконують різні функції: випарник охолоджує полиці з продуктом для заморожування, а конденсатор збирає на собі вологу, що випаровується з сировини в умовах вакууму. Для субліматора було визначено систему охолодження з використанням ребристого випарника, оскільки це забезпечує більшу ефективність для збільшення площі теплообміну.

В третьому розділі здійснено оцінку якості отриманих висушених бананів конвекційним та сублімаційним методом. Сушені банани методом сублімації показали деяке підвищення яскравості, а жовтизна залишалася стабільною або трохи підвищеною порівняно зі свіжими зразками бананів. Низька температура не викликає помітного стиснення та втрати об'єму в сировині. Конвективне сушіння через високі температури спричинило фізичні та хімічні зміни, а також руйнування текстури. Висока температура сушіння негативно вплинула на вологість та в'язкість продукту, що призвело до швидкої втрати структурної цілісності сировини. У порівнянні з традиційними методами сушіння сублімація сприяє меншому погіршенню кольору сировини.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування. Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6436/1/27.pdf>.
2. Снежкін Ю.Ф. Зниження енерговитрат при переробці фруктовово-овочевої сировини. Наук. праці ОНАХТ. Одеса, 2006. Вип. 28. Т.2. С.71-73.
3. Modelling and design of an efficient low temperature closed cycle dehydration system. URL: <https://repository.nwu.ac.za/items/2ed73935-d970-4a34-834d-7c10376e50f8>.
4. Implementación del proceso de liofilización que garantice el correcto funcionamiento del equipo liofilizador tipo conductor, que cumpla con los estándares del sistema de gestión de calidad. URL: <https://repositorio.utn.ac.cr/items/a8cce6af-fdf3-4bc5-902e-ce68bbb5b2f7>.
5. Diseño y construccion de un liofilizador piloto para el estudio de procesos de deshidratación y conservacion de productos agroindustriales mediante secado al vacío. URL: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/77a89401-571e-4acc-962a-685916ed092b/content>.
6. Сублімаційна сушка. Режим доступу: https://vuzlit.com/1883901/sublimatsiyna_sushka.
7. Технологія сублімаційної сушки продуктів. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tekhnologiya-sublimatsionnoy-sushki-produktov>.
8. Сублімаційна сушка продуктів. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/sublimatsionnaya-sushka-produktov/>.
9. Diseño y construcción de un equipo liofilizador para la carrera de ingeniería en alimentos. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/43959>.
10. Freezing and freeze-drying highly concentrated carbohydrate systems. URL: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7528/2/Wang17PhD.pdf>.
11. Як працює сублімація? Режим доступу: <https://frutta.ua/pages/how-it-works>.
12. Який робочий процес сублімаційної сушарки? Режим доступу: <https://ua.cnscientz.net/info/what-is-the-workflow-of-a-freeze-dryer-17198280978277376.html>.
13. Сублімаційна сушарка для дрібносерійного виробництва з полками 1,2 м². Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/catalog/sublimatsionnye-sushilki/sublimatsionnaya-sushilka-dlya-melkoseriynogo-proizvodstva-s-polkami-1-2-m2/>.
14. Cómo optimizar el proceso de liofilización en una liofilizadora. URL: <https://es.biobaseoverseas.com/blog/how-to-optimize-the-freeze-drying-process-in-a-freeze-dryer-1854965>.
15. The Importance of primary and secondary drying and their impact on lyophilization. URL: <https://www.pharmaceuticalonline.com/doc/the-importance-of-primary-and-secondary-drying-and-their-impact-on-lyophilization-0001>.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Freeze-drying process optimization. URL: <https://www.pharmtech.com/view/freeze-drying-process-optimization>.
17. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / Мирончук В.Г., Гулий І.С., Пушанко М.М.; за ред. В.Г. Мирончука. Вінниця: Нова книга, 2010. 720 с.
18. Вакуумний насос з ротуючими лопатками. Режим доступу: <https://www.yuanhuaiglobal.com/uk/application/Rotary-Vane-Vacuum-Pump>.
19. Одноступінчасті пластинчасто-роторні вакуумні насоси. Режим доступу: <https://pumpcentre.com.ua/ua/nasosy/vakuumnye-nasosy/plastinchato-rotornye-vakuumnye-nasosy/>.
20. Lyophilization / freeze drying – a review. URL: <https://www.researchgate.net/publication/292047227>.
21. Lyophilization – process and optimization for pharmaceuticals. URL: <https://www.researchgate.net/publication>.
22. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / В.Г. Мирончук, Л.О. Орлов, А.І. Українець та ін. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.
23. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2007. 648 с.
24. Liofilización: qué es y qué procesos implica? URL: <https://www.barnalab.com/blog/proceso-de-liofilizacion-y-etapas>.
25. Effects of drying technology on physiochemical and nutritional quality of fruits and vegetables. URL: <file:///C:/Users/admin/Downloads/EffectsofDryingTechnologyonPhysiochemicalandNutritionalQualityofFruitsandVegetables.pdf>.
26. Vliv lyofilizace na vlastnosti dýňového prášku. URL: <https://dk.upce.cz/server/api/core/bitstreams/235d49d1-4292-4754-b746-f0e2219dd5c7/content>.
27. Diseño térmico de un sistema de refrigeración en cascada R744/R717 para procesos de liofilización. URL: <https://apps.ucsm.edu.pe/UCSMERP/Docs/Tesis/011133.pdf>.