

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Донецький національний університет економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Навчально-науковий інститут ресторанно-готельного бізнесу та туризму
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробної і харчової
промисловості»
Цвіркун Л.О.
« ____ » _____ 2024 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 КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СУШКИ
ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ»**

Виконав:
здобувач вищої освіти Септа Руслан Русланович
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

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

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО

Навчально-науковий інститут ресторанно-готельного бізнесу та туризму
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

Форма здобуття вищої освіти денна

Ступінь бакалавр

Галузь знань Механічна інженерія

Освітня програма Обладнання переробної і харчової промисловості

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробної і харчової промисловості»

Цвіркун Л.О.

« » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Септи Руслана Руслановича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини»

Керівник роботи к.п.н., Цвіркун Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом першого проректора ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського від « 15 » листопада 2023 р. № 353-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 24 » травня 2024 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 сушіння плодово-овочевої сировини.

3. Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки.

4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Обладнання для сушіння плодово-овочевої сировини.

Схема удосконаленої інфрачервоно-конвективної сушарки.

Дослідження різних методів сушіння яблучної сировини.

6. Дата видачі завдання «23» листопада 2023 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	31.01.2024-15.02.2024
2	Аналіз обладнання для сушіння плодово-овочевої сировини	16.12.2024-10.03.2024
3	Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки	11.03.2024-15.04.2024
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2024-30.04.2024
5	Висновки по роботі	01.05.2024-12.05.2024
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2024-05.06.2024

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Септа Р.Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Цвіркун Л.О.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 42 сторінки. Робота містить 21 рисунок, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 12 найменувань.

Об'єкт роботи – інфрачервона сушарка.

Предмет роботи – технологічний процес виготовлення сушених яблучних скибочок.

Мета роботи – удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини.

У роботі зазначено, що плодово-овочева сировина не може довго зберігатися в природних умовах. Тому для продовження терміну придатності потрібні різні методи збереження: сушіння, заморожування, смаження. Процеси сушіння скорочують час висихання та мінімізують енергетичні витрати, зберігаючи при цьому високу якість продукції.

На основі аналізу, було зазначено, що інфрачервоне сушіння має низку переваг, включаючи рівномірний нагрів, короткий час обробки, високу швидкість теплопередачі, великий тепловий потік, високу енергоефективність і низьку вартість енергії. Інфрачервоне сушильне обладнання легко поєднується з іншими способами нагріву (конвекційне, вакуумне, мікрохвильове сушіння).

Запропоновано умови оптимізації процесу сушіння плодовоовочевої сировини: встановлення гнучкого зв'язку між способами сушіння та властивостями овочевої сировини, застосування технологій штучного інтелекту, комбінування декількох методів сушіння, оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини.

Удосконалено процес сушіння плодовоовочевої сировини шляхом поєднання двох конвекційних (гаряче повітря) і радіаційних механізмів теплообміну для підвищення теплової ефективності сушарок. Довжину хвилі джерела інфрачервоного випромінювання в сушарці пропонується обрати від 2,4 до 3 мкм (середній інфрачервоний діапазон), відстань 70 см від джерела інфрачервоного випромінювання. Температуру повітря, вологість, температуру сушіння та швидкість повітря можна змінювати в межах відповідного діапазону. Вхідна потужність інфрачервоної лампи становила 1,5 кВт. Для вимірювання температури сушильної камери пропонується застосовувати датчик та контролер температури. Одним з параметрів, що впливає на умови сушіння сировини є кількість інфрачервоного випромінювання, яке виробляє інфрачервоне джерело. Параметр запропоновано регулювати шляхом збільшення або зменшення вхідної напруги інфрачервоної лампи за допомогою регулятора потужності.

Досліджено різні методи сушіння яблучної сировини. Для порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок було здійснено процес сушіння у духовці за допомогою дегідрататора, використовуючи інфрачервону електричну сушарку. Інтерпретовано результати дослідження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: плодово-овочева сировина, інфрачервона сушарка, комбіновані методи сушіння, сушені яблучні скибочки, конвекційне, вакуумне, мікрохвильове сушіння, оптимізація процесів сушіння.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Технології сушіння харчової сировини	9
1.2 Інфрачервоне сушіння овочів та фруктів	12
1.3 Комбіновані методи інфрачервоного сушіння	15
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СУШКИ	20
2.1 Оптимізація процесу сушіння плодово-овочевої сировини	20
2.2 Удосконалення комбінованої інфрачервоно-конвективної сушарки	24
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
3.1 Харчова цінність яблук і користь для здоров'я	31
3.2 Дослідження різних методів сушіння яблучної сировини	32
ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41
ДОДАТКИ	42

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Септа</i>			Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					5	1
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>			ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО			
<i>Затверд.</i>		<i>Цвіркун</i>						

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що плодово-овочева сировина не може довго зберігатися в природних умовах. Тому для продовження терміну придатності потрібні різні методи збереження: сушіння, заморожування, смаження та варіння. Сушіння є дуже важливим, оскільки може зменшити відходи свіжої сировини та надати споживачеві різноманітну овочеву продукцію. Процеси сушіння мають скорочувати час висихання та мінімізувати енергетичні витрати, зберігаючи при цьому високу якість продукції.

Мета та задачі дослідження. Метою бакалаврської роботи є удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що інфрачервоне сушіння має низку переваг, включаючи рівномірний нагрів, короткий час обробки, високу швидкість теплопередачі, великий тепловий потік, високу енергоефективність і низьку вартість енергії. Інфрачервоне сушильне обладнання легко поєднується з іншими способами нагріву (конвекційне, вакуумне, мікрохвильове сушіння).

Запропоновано умови оптимізації процесу сушіння плодовоовочевої сировини: встановлення гнучкого зв'язку між способами сушіння та властивостями овочевої сировини, застосування технологій штучного інтелекту, комбінування декількох методів сушіння, оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини.

Удосконалено процес сушіння плодовоовочевої сировини шляхом поєднання двох конвекційних (гаряче повітря) і радіаційних механізмів теплообміну для підвищення теплової ефективності сушарок. Довжину хвилі джерела інфрачервоного випромінювання в сушарці пропонується обрати від 2,4 до 3 мкм (середній інфрачервоний діапазон), відстань 70 см від джерела інфрачервоного випромінювання. Температуру повітря, вологість, температуру сушіння та швидкість повітря можна змінювати в межах відповідного діапазону. Вхідна потужність інфрачервоної лампи становила 1,5 кВт. Для вимірювання температури сушильної камери пропонується застосовувати датчик та контролер температури. Одним з параметрів, що впливає на умови сушіння сировини є кількість інфрачервоного випромінювання, яке виробляє інфрачервоне джерело. Параметр запропоновано регулювати шляхом збільшення або зменшення вхідної напруги інфрачервоної лампи за допомогою регулятора потужності.

Досліджено різні методи сушіння яблучної сировини. Для порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок було здійснено процес сушіння у духовці за допомогою дегідратору, використовуючи інфрачервону електричну сушарку. Інтерпретовано результати дослідження.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Септа</i>				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						6	1
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>							

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

1.1 Технології сушіння харчової сировини

Харчові продукти, такі як риба, м'ясо, фрукти та овочі складаються з низки поживних компонентів, таких як білки, вуглеводи, вітаміни, ароматизатори, пігменти, антиоксиданти та мінеральні сполуки, які є корисними для здоров'я людини. Проте ці харчові продукти не можуть довго зберігатися в природних умовах. Тому для продовження терміну придатності сировини потрібні різні методи збереження, включаючи сушіння, заморожування, смаження та варіння. Сушіння є дуже важливим, оскільки це може зменшити відходи свіжої сировини та надати споживачеві різноманітну овочеву продукцію. Процеси сушіння мають скорочувати час висихання та мінімізувати енергетичні витрати, зберігаючи при цьому високу якість продукції.

У харчовій промисловості сушка є однією з найбільш поширених і енерговитратних процесів, яка пов'язана з тепломасообміном. В результаті сушіння відбувається випаровування води шляхом підведення тепла до вологих харчових продуктів. Сушіння в основному використовується для консервування харчових продуктів і подовження терміну їх зберігання шляхом зниження вмісту вологи до низького рівня [1, 2, 3]. За механізмом теплообміну сушіння можна класифікувати на пряме (конвекція), непряме або контактне (кондукція), променисте (випромінювання) та діелектричне або мікрохвильове (радіочастотне) сушіння. Останнім часом удосконалюються наступні технології сушіння: мікрохвильова сушка, сублімаційна сушка, сушка розпиленням, електрична рідинна сушка, вакуумна сушка, інфрачервона сушка, змішана сушка. Технології мають низку переваг: коротший час сушіння, краще утримання поживних речовин, краще збереження кольору та краща якість.

1. Конвективне сушіння найбільш застосовувана технологія сушіння. Її використовують для сушіння рослин, насіння, фруктів, м'яса, риби. Для масштабних виробництв обмеження конвективного сушіння добре відомі, такі як високі витрати, велика потреба в просторі, відсутність можливості контролювати процес сушіння, можливе руйнування структури сировини.

У процесі конвективного сушіння передача тепла та вологи між рослинними матеріалами та гарячим повітрям відбуваються одночасно. Тепло передається від гарячого повітря до поверхонь матеріалу, а потім переходить до внутрішньої частини матеріалів [1]. Внутрішня волога матеріалів переходить до поверхні, а потім випаровується в навколишнє середовище. Рушійна сила теплообміну є різниця температур, а рушійна сила масообміну – різниця вологи

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Септа</i>				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						7	13
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>							

або різниця парціального тиску водяної пари. Два процеси мають тісний взаємозв'язок, але в протилежних напрямках. У процесі конвективного сушіння вода на поверхні матеріалів висушується потоком гарячого повітря. Коли вміст вологи у зовнішній частині нижчий, ніж у внутрішній частині, різниця виникає в концентрації вологи. Конвективна багатошарова сушарка представлена на рисунку 1.1.

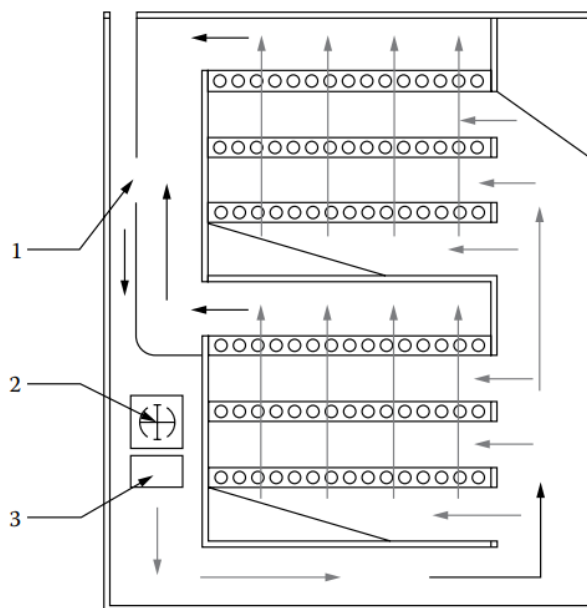


Рисунок 1.1 – Конвективна багатошарова сушарка

На рисунку 1.1 позначено: 1 – вихід вологого повітря, 2 – циркуляційна центрифуга, 3 – паровий нагрівач.

Конвективна багатошарова сушарка має більше однієї сировини. У цьому обладнанні проходить потік гарячого повітря в трьох шарах підготовлених овочів. Тепло внаслідок цього процесу може поглинатися тричі за один цикл. Частина використаного гарячого повітря вичерпується, але більшу частину використаного гарячого повітря можна знову накачати до парового нагрівача для повторного використання в наступному циклі. Однак, недоліком цієї сушарки є те, що швидкість висихання матеріалів у різних шарах відрізняються. Гаряче повітря є не тільки носієм тепла, а й води в овочах. Матеріали нижнього шару легко сушити, але матеріали верхнього шару, які сушать при низькій температурі та високому вмісті вологи, мають низьку швидкість висихання. За допомогою цієї система можна досягти рівномірного висихання.

Сітчасту конвекційну стрічкову сушарку періодичної дії представлено на рисунку 1.2. Сусідні конвеєрні стрічки мають протилежні напрямки руху і сировина може бути транспортована з верхнього шару до нижнього, де гаряче повітря проходить через сітчасті стрічки знизу вгору. В обладнанні із сітчастою стрічкою попередньо оброблені матеріали автоматично подаються зверху. У процесі сушіння матеріали переміщуються на нижній конвеєр [1, 3]. Плодово-овочеву сировину з підвищеним вмістом вологи сушать у верхніх шарах, таким чином, більше тепла може передаватися матеріалам і ефективність сушіння

може бути покращена. Загалом обладнання із сітчастою стрічкою не лише забезпечує безперервне сушіння, але й має високу ефективність сушіння.

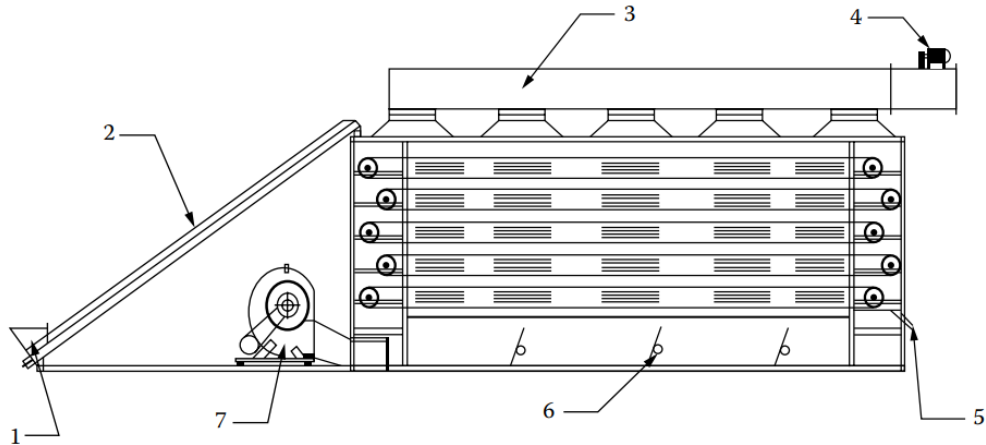


Рисунок 1.2 – Сітчаста конвекційна стрічкова сушарка

На рисунку 1.2 позначено: 1 – бункер для сировини, 2 – автоматична машина, 3 – патрубок для відведення вологи, 4 – відкачування вологи, 5 – розвантажувальний пристрій, 6 – повітря регулююча пластина, 7 – вентилятор гарячого повітря.

2. Кондукційне сушіння включає групу різних методів сушіння, наприклад, ротаційне сушіння, сушіння в киплячому шарі, барабанне сушіння, сублімаційне сушіння та вакуумне сушіння. Схему установки вакуумної сушарки представлено на рисунку 1.3. Технологія сушіння дозволяє матеріалам контактувати з нагрівальною пластинною безпосередньо для передачі енергії від нагрівальної плити до матеріалів. Проте більшість продуктів харчування, в тому числі овочі, є поганими провідниками тепла. Тому ця характеристика робить кондуктивне сушіння енерговитратним та трудомістким [3].

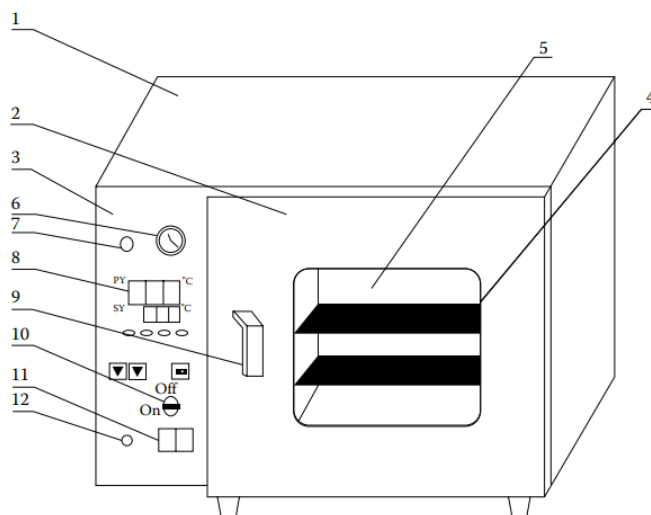


Рисунок 1.3 – Схема установки вакуумної сушарки

На рисунку 1.3 позначено: 1 – корпус, 2 – дверцята шафи, 3 – панель, 4 – полиця, 5 – сушильна камера, 6 – вакуумметр, 7 – клапан спуску, 8 – регулятор

температури, 9 – дверна ручка, 10 – вакуумний клапан, 11 – вимикач живлення, 12 – живлення.

У типовій системі сушіння з киплячим шаром гаряче повітря швидко проходить через матеріали і киплячий шар з'єднаний з вібраційним двигуном (рис. 1.4).

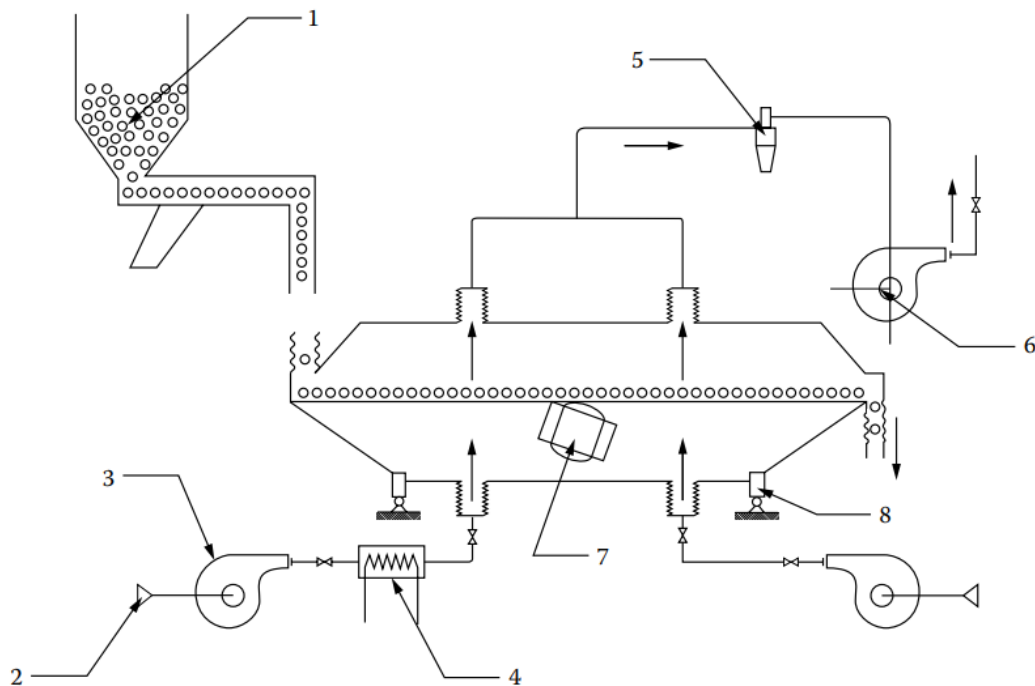


Рисунок 1.4 – Сушіння в киплячому шарі

На рисунку 1.4 позначено: 1 – сировина; 2 – фільтр; 3 – вентилятор; 4 – подача тепла, 5 – циклонний сепаратор, 6 – вентилятор; 7 – вібродвигун.

Сушка в киплячому середовищі вважається однією з найкращих та має такі переваги [1, 2]:

- потік повітря з високою температурою та низьким вмістом вологи має достатній контакт з гранульованими матеріалами і більша частина потоку гарячого повітря може бути переробленою, швидкість сушіння та енергоефективність є високими;

- обладнання відносно просте, вимагає невеликих капіталовкладень і є простим в обслуговуванні;

- процес сушіння легко контролювати, а сушіння рослинних матеріалів відбувається стабільно.

3. Мікрохвильове і радіочастотне сушіння можна віднести до діелектричного сушіння. Радіаційна сушка – випромінювання або передача енергії у формі хвиль або частинок через простір або через матеріальне середовище. Вона включає електромагнітне випромінювання: радіохвилі, видиме світло, рентгенівське випромінювання, випромінювання частинок (наприклад, α , β і нейтронне випромінювання), а також акустичне випромінювання. Радіаційна сушка має величезні переваги щодо швидкості сушіння. Найкориснішими методами радіаційної сушки є діелектрична та інфрачервона сушка. Діелектрична енергія може проникати в матеріали та

									Арк.
									10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ				

нагрівати продукти без допомоги температурних градієнтів, що позитивно впливає на зневоднення. Вода в їжі часто є основним компонентом, яка є відповідальною за діелектричне нагрівання/сушіння. Завдяки своїй дипольній природі молекули води намагаються слідувати за електричним полем, коли вони обертаються на дуже високих частотах. Іони, які присутні в солоній їжі, мігрують під впливом електричного поля тим самим виділяючи тепло [1, 2, 3]. При сушінні будь-якого матеріалу дуже важливо підвищувати швидкість сушіння, щоб запобігти термічному пошкодженню продукту. Водночас, мати необхідно сушений продукт з рівномірним вмістом вологи для більш тривалого терміну зберігання, а також отримання кращих показників сировини. Використання мікрохвиль є найбільш відповідним варіантом для вирішення цих проблем, оскільки забезпечує об'ємне нагрівання, яке призводить до отримання однорідного висушеного продукту. Внутрішнє виділення тепла під час високочастотного сушіння швидко генерує пари всередині матеріалу. Це створює різницю тиску, що призводить до масообміну. Чим вищий вміст вологи, тим більша різниця тиску, що призводить до дуже швидкого висихання без перегріву поверхні виробу.

4. Сушіння за допомогою ультразвуку. Ультразвук доставляється до висушеного матеріалу через повітря в сушильній камері. Ультразвук, що передається від потужного ультразвукового перетворювача через повітря до висушеного матеріалу (рис. 1.5).

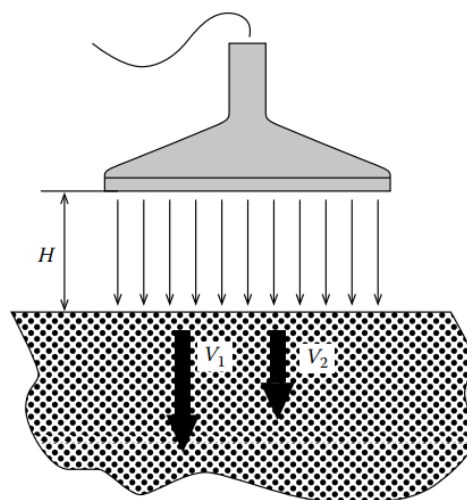


Рисунок 1.5 – Ультразвук, що передається від потужного ультразвукового перетворювача через повітря до висушеного матеріалу

5. Сублімаційне сушіння забезпечує найкращу якість продукту, оскільки заморожений продукт не може розплавитися під час сушіння. Воно запобігає усадці та створює високопористий матеріал з дуже хорошими властивостями регідратації. Єдиним обмеженням є висока вартість через високе споживання енергії. Сублімаційна сушка складається з двох етапів: 1 – заморожування продукту, 2 – сублімація замороженої води безпосередньо з твердої фази в газову при нижчій температурі. В результаті структура їжі не буде сильно пошкоджена [1, 2]. Подібну характеристику має вакуумна сушка, яка може сушити продукти під низьким вакуумом, що, у свою чергу, знижує температуру

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

сушіння. Обидві технології мають перевагу сушіння за нижчих температур, що є корисним для термочутливих атрибутів якості. Низька температура обробки і відсутність повітря може звести до мінімуму погіршення якості продукту. Тому, серед доступних методів сушіння ці два є найкращими для отримання високої якості сушених харчових продуктів, але вони набагато дорожчі, ніж конвективне сушіння.

1.2 Інфрачервоне сушіння овочів та фруктів

Свіжі фрукти та овочі схильні до псування при кімнатній температурі та потребують обробки, щоб збільшити термін їх зберігання. Сушка дозволяє ефективно продовжити термін зберігання фруктів і овочів, знизити витрати на їх транспортування, підвищити зручність транспортування. Однак процес сушіння фруктів та овочів складний і умови сушіння необхідно оптимізувати, щоб забезпечити якість продукції та знизити виробничі витрати. Принцип сушіння полягає в передачі вологи всередині фруктів і овочів назовню за допомогою передачі тепла, а також у зменшенні вмісту вологи у плодово-овочевій сировині. У промисловому виробництві тепло, зазвичай, надходить з електрики, вугілля та природного газу. Однак процес сушіння фруктів та овочів є відносно тривалим, що призводить до надмірного споживання енергії.

Фрукти мають дуже короткий термін зберігання через високий вміст вологи (вище 82%) і важливо використовувати різні методи зберігання, щоб збільшити термін їх збереження. Одним з найдавніших методів збереження сировини є сушка, яка полягає у видаленні води з виробляемого продукту. Одним із способів скорочення часу висихання є забезпечення теплом за рахунок ІЧ-випромінювання. Ця техніка нагрівання особливо підходить для висушування тонких шарів речовини з великою поверхнею, що піддається впливу випромінювання. Принципова схема інфрачервоної сушки представлена на рисунку 1.6.

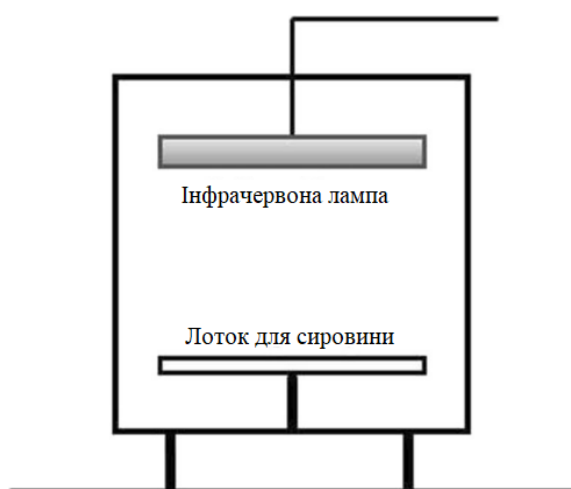


Рисунок 1.6 – Принципова схема інфрачервоної сушки [3]

Інфрачервоне сушіння є типом електромагнітного випромінювання. На основі дії довжини хвилі ІЧ-випромінювання джерело взаємодіє з внутрішньою

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурою харчових продуктів і таким чином збільшується його температура та полегшується випаровування вологи в сировині. Під час процесу інфрачервоного сушіння середовище для передачі енергії від джерела до продуктів харчування не потрібне. Коли ІЧ-випромінювання діє на поверхню харчових продуктів його частина може відбиватися, поглинатися або пропускатися. Це залежить від природи ІЧ-випромінювання та характеристик поверхні харчових продуктів. Інфрачервона технологія сушіння є надзвичайно важливим джерелом теплової обробки

Інфрачервоне випромінювання – електромагнітне випромінювання в діапазоні довжини хвиль 0,78–1000 мкм. ІЧ-випромінювання класифікують за трьома категоріями: ближній інфрачервоний (0,75–2,5 мкм), середній інфрачервоний (2,5–25 мкм) і далекий інфрачервоний діапазон (25–1000 мкм). ІЧ-енергія від випромінювача включає різні довжини хвилі і кожна довжина хвилі залежить від кількох чинників, включаючи, температуру та коефіцієнт випромінювання випромінювача [1, 2, 3]. Технологія залежить від потенціалу джерел ІЧ-випромінювання, якими є спеціальні електричні лампи та керамічні або металеві панелі, що нагріваються від електроенергії або газу. Джерело взаємодіє з внутрішньою структурою зразка і таким чином підвищується його температура і сприяє випаровуванню вологи. Відмінною особливістю ІЧ-сушіння є те, що воно може передавати енергію від джерела до зразка без середовища і зразок можна розглядати як поглинач ІЧ-випромінювання для здійснення процесу сушіння. Основними харчовими компонентами є вода, білок, ліпіди та цукор, отже, інфрачервона сушка заснована на властивості води поглинати ІЧ-випромінювання.

Інфрачервоне сушіння є одним із потенційних методів через низку переваг, таких як висока швидкість теплопередачі, висока швидкість сушіння, рівномірний розподіл температури, зменшення втрат поживних речовин, значна економія енергії та збереження навколишнього середовища. ІЧ-сушка є перспективним методом для отримання високоякісних сушених харчових продуктів, таких як скибочки яблук, винограду, персика, скибочок цибулі, моркви тощо. Переваги інфрачервоного сушіння сировини:

1. Висока швидкість теплопередачі: передача ІЧ-енергії від джерела нагріву до зразки продукції не потребує нагрівання навколишнього повітря. Таким чином, температура внутрішніх шарів зразка вища, ніж у навколишнього повітря. В результаті сушіння зразка сушка відбувається з середини до зовнішніх шарів через радіаційні та конвекційні теплові явища. Це призводить до високої швидкості теплопередачі.

2. Висока швидкість висихання: висока швидкість теплопередачі ІЧ-випромінювача призводить до зменшення часу висихання і збільшення швидкості висихання. Рівномірний розподіл температури: вибір відповідного діапазону довжини хвиль ІЧ-випромінювання для харчових продуктів є сприятливим для рівномірної температури та розподілу енергії по поверхні продукту.

3. Зменшення втрати поживних речовин: можна генерувати вибіркоче ІЧ-випромінювання певних смуг за допомогою певних видів кераміки. ІЧ-випромінювання може значно проникати в зразок і ефективно впливати на воду

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на молекулярному рівні. Цей спосіб полегшує процес сушки і зменшує втрати поживних речовин висушеного продукту.

4. Значна економія енергії: ІЧ-енергія передається безпосередньо зразку за законами оптики. Таким чином, для теплового потоку немає опору як і у випадку конвекції. Це призводить до значної економії енергії.

5. Екологічність: ІЧ-випромінювання нешкідливе для людини. Крім того, порівняно з викопним паливом, воно не забруднює навколишнє середовище, а також є відновлюваним.

Порівняно з традиційним сушінням (гарячим повітрям, заморожуванням і сушінням у мікрохвильовій печі) інфрачервоне сушіння має багато переваг, включаючи рівномірний нагрів, короткий час обробки, високу швидкість теплопередачі, великий тепловий потік, високу енергоефективність і низьку вартість енергії. Це може ефективно скоротити час сушіння фруктів і овочів, підвищити ефективність сушіння та якість фруктів і овочів [3]. Інфрачервоне сушильне обладнання легко модифікується, адаптується, просте, легко поєднується з іншими способами нагріву (конвекційне, вакуумне, мікрохвильове сушіння). У порівнянні з традиційним сушінням гарячим повітрям, основна перевага полягає в тому, що воно має вищу ефективність сушіння, що може ефективно скоротити час сушіння та покращити якість продукції, а саме має переваги на ранніх і середніх стадіях сушіння. Ефективність сушіння набагато вища, ніж у сушіння гарячим повітрям. Це може значно скоротити час сушіння та зменшити споживання енергії. В таблиці 1.1 наведено переваги інфрачервоної сушки в порівнянні з іншими способами сушіння.

Таблиця 1.1 – Переваги інфрачервоної сушки в порівнянні з іншими способами сушіння

Спосіб сушіння	Переваги інфрачервоної сушки
Сушка гарячим повітрям	Коротший час сушіння, менше споживання енергії та краща якість продукції
Сублімаційна сушка	Коротший час сушіння, нижчі витрати на обладнання та менше споживання енергії
Сушка в мікрохвильовій печі	Температуру сушіння легко контролювати і вона не перегрівається завдяки безперервному нагріванню
Вакуумна сушка	Коротший час висихання та нижча вартість обладнання

Застосування інфрачервоної технології у процесі сушіння фруктів та овочів може бути перспективною для харчової промисловості: зменшення споживання енергії, зменшення використання електричної енергії та частково усунути проблеми, які спричинені скороченням електроенергії, виробляти високоякісну продукцію, яка більш приваблива для споживачів при відповідних умовах. Технологія має високу економічну ефективність, що відображається у

зниженні цін на сировину (природний газ) та обладнання, вищій ефективності використання енергії, коротшому часі сушіння та кращій якості плодоовочевої продукції. Ця технологія має широкі перспективи застосування та високу цінність стимулювання індустріалізації.

Незважаючи на те, що інфрачервона сушка має багато переваг її промислове застосування все ще стикається з деякими проблемами. Наприклад, інфрачервона проникність слабка, що ускладнює сушіння фруктів і овочів на пізніх стадіях, що може вимагати поєднання ІЧ-сушки з іншими методами сушіння у виробництві для кращого досягнення мети економії енергії. Деякі фрукти та овочі, такі як яблука та картопля, схильні до потемніння при високих температурах протягом тривалого часу та вимагають дуже суворих умов сушіння для забезпечення оптимізації смаку та зовнішнього вигляду. Під час обробки необхідно контролювати температурний режим, щоб досягти балансу між скороченням часу сушіння та контролем якості продукту.

1.3 Комбіновані методи інфрачервоного сушіння

1. Комбіноване ІЧ та сублімаційне сушіння овочів.

Сублімаційне сушіння широко використовується для отримання високоякісних зневоднених овочів. Однак сублімаційне сушіння є повільним і часто малопродуктивним процесом. Поєднання ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням є новим методом, який продемонстрував великий потенціал у промисловому застосуванні. Одночасна інфрачервона сублімаційна сушка – це двоетапний процес сушіння з інфрачервоною попередньою дегідратацією з подальшим сублімаційним сушінням [1, 2, 3]. Деякі з обмежень звичайних технологій зневоднення, таких як сушіння на повітрі або сублімація, можна вирішити комбінованим ІЧ-випромінюванням і сублімаційним сушінням. Результати показують, що комбінація сублімаційного сушіння з подальшим сушінням у середньому інфрачервоному випромінюванні заощаджує до 48% часу сушіння порівняно з лише методом сушіння заморожуванням. Сушіння в середньому ІЧ перед сушінням сублімацією виявилось гіршим порівняно з сушінням у середньому ІЧ-випромінюванні після сублімаційного сушіння. Поєднання сушіння в середньому ІЧ-випромінюванні з сублімаційним сушінням мало значний ефект на збереженні аромату.

2. Комбіноване ІЧ-сушіння та сушіння гарячим повітрям овочів. Поєднання ІЧ-системи з системою сушіння гарячим повітрям є ефективним і швидким методом сушіння порівняно з використанням будь-якого з них окремо. Комбінована система має такі переваги, як висока якість висушених продуктів і хороші характеристики сушіння, бо тепломасообмін відбувається краще, що призводить до зменшення часу сушіння, зниження споживання енергії та підвищення енергоефективності. Протягом сушіння, температура продукту підтримується відносно низькою і тому ІЧ підходить для термочутливих продуктів. На рисунку 1.7. представлено схему конвекційної сушарки з інфрачервоним випромінюванням.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

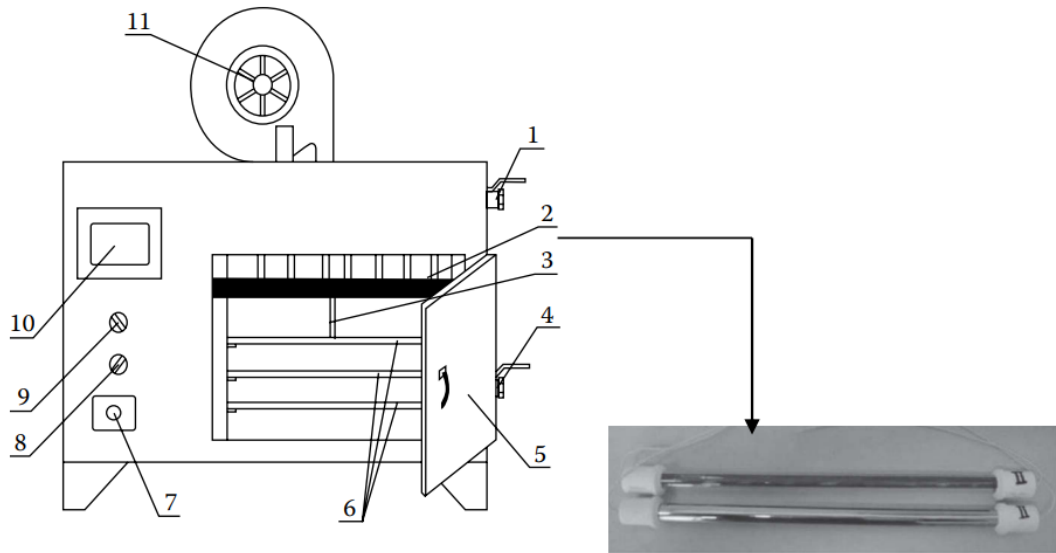


Рисунок 1.7 – Конвекційна сушарка з інфрачервоним випромінюванням [1]

На рис. 1.7 позначено: 1 – повітрозабірник, 2 – радіаційна трубка, 3 – датчик температури, 4 – вихід повітря, 5 – двері, 6 – пластина навантажувального матеріалу, 7 – повітря регулятор, 8 – перемикач (регулювання повітродувки), 9 – перемикач (керуюча нагрівальна трубка), 10 – екран дисплея, 11 – вентилятор.

Результати досліджень показали, що енергія і вартість експлуатації комбінованої моделі сушіння багатьох продуктів харчування були нижчими, ніж у традиційній системі сушіння, що потребує визначення оптимальних умов роботи комбінованого ІЧ-сушіння та сушіння гарячим повітрям для отримання покращених продуктів високої якості задля зниження енергоспоживання [3]. ІЧ-випромінювання можна використовувати як ефективний метод сушіння овочів, але тільки тоді, коли вологість перевищує 50%. Швидкість висихання значно вища, ніж при сушінні на повітрі, а час сушіння коротший. Тому, щоб досягти максимальної швидкості сушіння, отримати високоякісний продукт, уникнути потемніння, викликаного високою температурою, було рекомендовано використовувати ІЧ-випромінювання для видалення 25% вологи, а потім використовувати сушку гарячим повітрям.

Застосування електромагнітного випромінювання разом з гарячим повітрям вважається більш ефективним у порівнянні із застосуванням лише гарячого повітря або лише радіаційного нагріву. Сировина, що піддається впливу ІЧ-випромінювання, поглинає випромінювання та призводить до посилення молекулярної вібрації, яка виділяє тепло у матеріалі не тільки на поверхні, а також у внутрішніх шарах [2]. ІЧ-обігрів підвищує швидкість зволоження, рух до поверхні, а потік повітря видаляє вологу з поверхні, знижує температуру поверхні і збільшує масообмін. Температура або інтенсивність випромінювання, швидкість повітря та повітря температури є основними змінними процесу в ІЧ сушінні.

3. Комбіноване інфрачервоне та вакуумне сушіння овочів (рис. 1.8).

ІЧ-випромінювання може прискорити процес сушіння харчових продуктів і сільськогосподарських матеріалів. Для отримання високоякісного висушеного продукту перевага віддається нижчій температурі сушіння. Вакуумна сушка є одним із можливих методів досягнення цієї мети, оскільки під вакуумом волога випаровується при більш низькій температурі через її нижчу температуру кипіння.

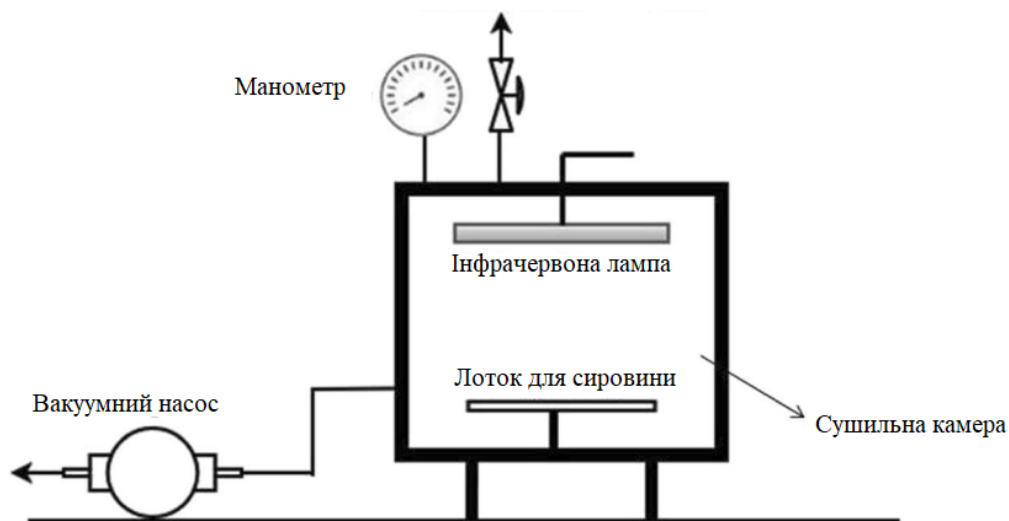


Рисунок 1.8 – Комбіноване інфрачервоне та вакуумне сушіння [3]

Висушування під вакуумом також може призвести до висушування продуктів з високою якістю через більш низьку температуру сушіння і нижчий рівень окисних реакцій. Результати підтверджують, що потужність ІЧ-випромінювання, вакуум, тиск і товщина сировини істотно впливають на кінетику сушіння різних продуктів.

4. Комбіноване інфрачервоне та мікрохвильове сушіння овочів (рис. 1.9). Мікрохвильова сушка, яка характеризується низькими втратами енергії та високим нагріванням, протягом багатьох років застосовувалась для сушіння фруктів і овочів.

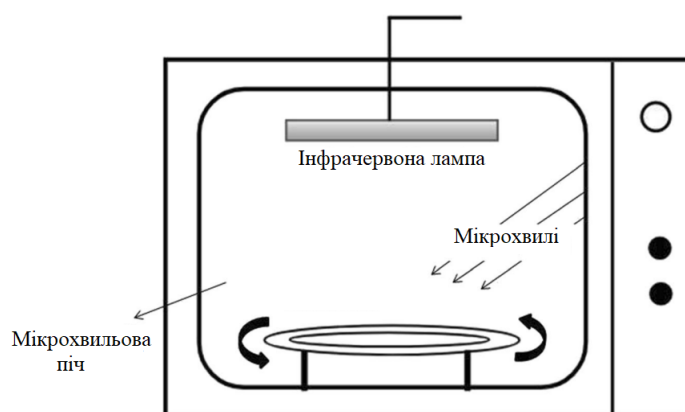


Рисунок 1.9 – Комбіноване інфрачервоне та мікрохвильове сушіння [3]

Проте проблема сушіння в мікрохвильовій печі полягає в накопиченні вологи на поверхні їжі, що призводить до того, що поверхня стає мокрою замість хрусткої. Тому спосіб видалення зволоження з поверхні за допомогою додаткового джерела тепла або шляхом застосування умов вакууму необхідно прийняти підвищення температури поверхні. ІЧ-сушка з перевагами високої

						ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			17

швидкості сушіння, економії енергії та рівномірного розподілу температури може вирішити проблему мікрохвильової сушки.

Результати показали, що швидкість сушіння може бути прискорена шляхом збільшення потужності мікрохвиль та ІЧ-випромінювання зі зниженням абсолютного тиску. Характеристики овочевої сировини були вищої якості (такі як зміни кольору, текстури). В таблиці 1.2 представлено переваги комбінованих методів інфрачервоного сушіння.

Таблиця 1.2 – Переваги комбінованих методів інфрачервоного сушіння

Комбіновані методи інфрачервоного сушіння	Характеристика
Комбіноване ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням	Сублімаційне сушіння широко використовується для отримання високоякісних зневоднених овочів. Однак сублімаційне сушіння є повільним і часто малопродуктивним процесом. Поєднання ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням є новим методом, який продемонстрував великий потенціал у промисловому застосуванні. Одночасна інфрачервона сублімаційна сушка – це двоетапний процес сушіння з інфрачервоною попередньою дегідратацією з подальшим сублімаційним сушінням.
Комбіноване ІЧ-сушіння та сушіння гарячим повітрям	Поєднання ІЧ-системи з системою сушіння гарячим повітрям є ефективним і швидким методом сушіння порівняно з використанням будь-якого з них окремо. Комбінована система має такі переваги, як висока якість висушених продуктів і хороші характеристики сушіння, бо тепломасообмін відбувається краще, що призводить до зменшення часу сушіння, зниження споживання енергії та підвищення енергоефективності.
Комбіноване інфрачервоне та вакуумне сушіння	Для отримання високоякісного висушеного продукту перевага віддається нижчій температурі сушіння. Вакуумна сушка є одним із можливих методів досягнення цієї мети, оскільки під вакуумом волога випаровується при більш низькій температурі через її нижчу температура кипіння. Потужність ІЧ-випромінювання, вакуум, тиск і товщина сировини істотно впливають на кінетику сушіння на різні продукти.

Комбіноване інфрачервоне та мікрохвильове сушіння

У процесі сушіння в мікрохвильовій печі волога накопичується на поверхні їжі, що призводить до того, що поверхня стає мокрою замість хрусткої. Тому спосіб видалення зволоження з поверхні за допомогою додаткового джерела тепла або шляхом застосування умов вакууму необхідно прийняти підвищення температури поверхні. ІЧ-сушка з перевагами високої швидкості сушіння, економії енергії та рівномірного розподілу температури вирішить проблему мікрохвильової сушки.

На відміну від теплообміну конвекцією, при сушці за допомогою інфрачервоного теплового випромінювання, забезпечується ефективний нагрів зразка, в результаті чого вода виділяється швидше. Інфрачервона сушка розглядається як м'який спосіб сушіння, що добре адаптований до потреб овочів зі збереженням поживних речовин і низької витрати енергії. Швидкість сушіння підвищувалась з підвищенням температури і залежить від товщини скибочок. Тому доцільно поєднувати інфрачервоне сушіння з іншими методами, наприклад, з конвективним, мікрохвильовим, сублімаційним тощо.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння є дуже важливим, оскільки може зменшити відходи свіжої сировини та надати споживачеві різноманітну овочеву продукцію. Процеси сушіння мають скорочувати час висихання та мінімізувати енергетичні витрати, зберігаючи при цьому високу якість продукції.

За механізмом теплообміну сушіння можна класифікувати на: пряме (конвекція), непряме або контактне (кондукція), променисте (випромінювання), і діелектричне або мікрохвильове (радіочастотне) сушіння. Останнім часом удосконалюються технології сушіння: мікрохвильова сушка, сублімаційна сушка, сушка розпиленням, електрична рідинна сушка, вакуумна сушка, інфрачервона сушка, змішана сушка.

Порівняно з традиційним сушінням інфрачервоне сушіння має багато переваг, включаючи, рівномірний нагрів, короткий час обробки, високу швидкість теплопередачі, великий тепловий потік, високу енергоефективність і низьку вартість енергії. Це може ефективно скоротити час сушіння фруктів і овочів, підвищити ефективність сушіння та якість фруктів і овочів. Інфрачервоне сушильне обладнання легко модифікується, адаптується, просте, легко поєднується з іншими способами нагріву (конвекційне, вакуумне, мікрохвильове сушіння). У порівнянні з традиційним сушінням гарячим повітрям, основна перевага полягає в тому, що воно має вищу ефективність сушіння, що може ефективно скоротити час сушіння та покращити якість продукції, а саме має переваги на ранніх і середніх стадіях сушіння.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СУШКИ

2.1 Оптимізація процесу сушіння плодово-овочевої сировини

Яблука дуже поживні та багаті харчовими волокнами, вітамінами, феноловими кислотами, флавоноїдами та іншими харчовими компонентами, які сприяють нормалізації серцево-судинних захворювань, діабету, артеріального тиску. Проте високий вміст вологи в свіжих яблуках сприятливий до бактеріального зараження при зберіганні, консервації та транспортуванні, що спричиняє псування сировини. Смак і товарна цінність яблук значно погіршуються шляхом бактеріального зараження. Тому більшість яблук переробляють на сушені скибочки задля збереження початкової якості.

У процесі сушіння більша частина волога з фруктів і овочів має бути видалена, задля мінімізації росту мікроорганізмів, подовження терміну зберігання, зменшення об'єму та полегшення транспортування. Для здійснення сушіння застосовуються різні технології: мікрохвильова сушка, сублімаційна сушка, сушка розпиленням, електрична рідинна сушка, вакуумна сушка, інфрачервона сушка, змішана сушка.

Інфрачервона сушка часто використовується в переробці фруктів і овочів через рівномірний нагрів та не великий час сушіння. Результати досліджень науковців доводять, що використання ІЧ-випромінювання суттєво скорочує час сушіння та енергоспоживання порівняно з гарячим повітрям та сприяє збереженню поживних речовин [6, 7]. Основними перевагами ІЧ-випромінювання для зневоднення сировини є:

- відсутність теплоносія здатного призвести до забруднення оброблюваного матеріалу;
- екологічність процесу;
- відсутність зон перегріву поблизу теплопередаючих стінок;
- здатність тепловиділення у всьому обсязі матеріалу;
- прозорість повітря для випромінювання певної довжини хвилі;
- відсутність впливу агрегатного стану матеріалу на технологічний процес сушіння.

Велику роль відіграють умови сушіння, вплив фізико-хімічних властивостей сировини, температура сушіння, швидкість повітря, відносна вологість та відстань інфрачервоного випромінювання. Відповідні умови сушіння можуть покращити швидкість сушіння, зменшити втрати поживних речовин, краще зберегти колір продукції. Тому оптимізація умов сушіння сприятиме покращенню якості кінцевої сушеної плодовоовочевої сировини.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Септа</i>						20	11
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>							ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО

Для інфрачервоного сушіння головним фактором, що впливає на якість кінцевої сировини є довжина хвилі випромінювання ІЧ-генератора. Неузгодженість оптичних властивостей випромінювача зі спектральними характеристиками сировини, що опромінюється, призводить до незворотних хімічних реакцій та втрати якості. Тому, при виборі довжини хвилі випромінювання для сушіння сировини слід враховувати те, що вода в продукті повинна мати максимальну поглинальну здатність при заданому максимумі довжини хвилі випромінювання, тоді як корисні компоненти сухої речовини при цій же довжині хвилі випромінювання повинні володіти максимальною пропускнуою здатністю [8, 9, 12]. Проте, ефективність процесу сушіння сировини ІЧ-випромінюванням залежить не тільки від узгодження оптичних властивостей випромінювача та спектральних характеристик сировини, що опромінюється, але і від їх правильного вибору та заходів енергетичної ефективності. В даний час на ринку випускаються генератори ІЧ-випромінювання різних марок, типів та конструкцій. Класифікація генераторів ІЧ-випромінювання наведена на рисунку 2.1.

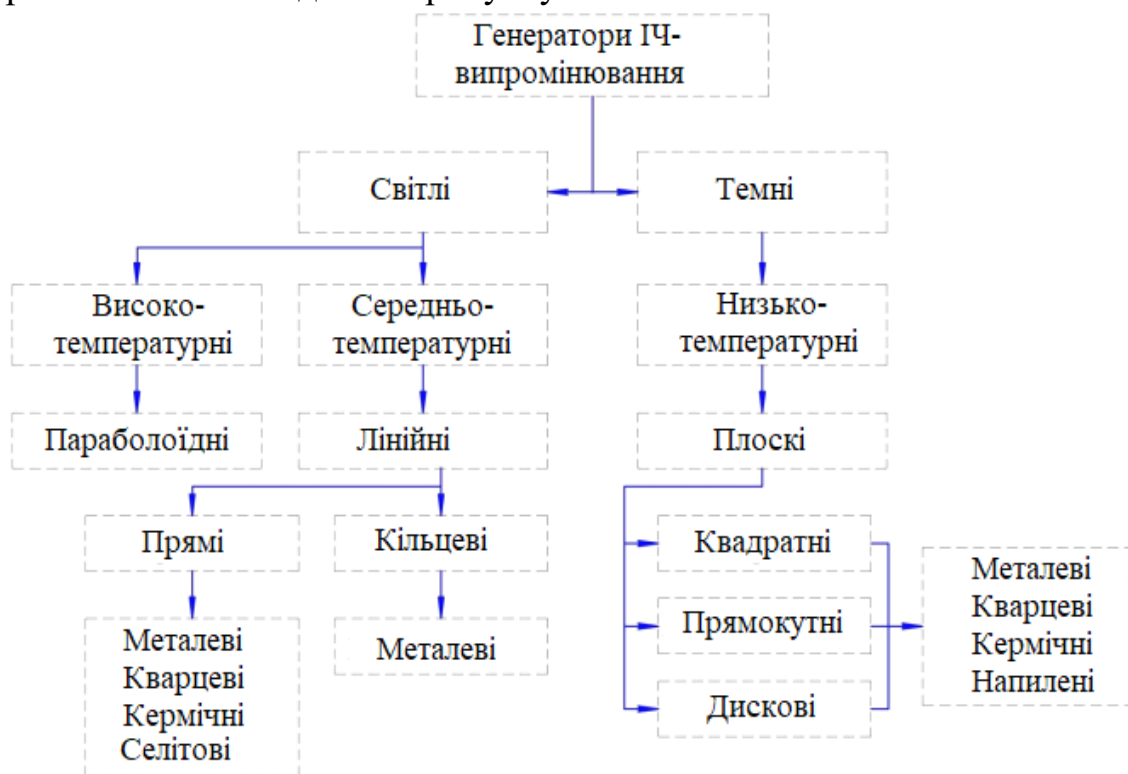


Рисунок 2.1 – Класифікація генераторів ІЧ-випромінювання

Тип генератора ІЧ-випромінювання та спосіб його нагрівання характеризує форма та матеріал випромінюючого тіла. Тому конструктивні, технологічні параметри сушильного обладнання залежать від генераторів ІЧ-випромінювання, які визначають розміри сушильної камери, відстань від джерела до продукту та параметри впливу опромінення на матеріал, що підлягає сушінню.

Як відомо сушіння енергоємний процес. Інфрачервоне випромінювання – електромагнітне випромінювання, що здійснюється в діапазоні довжини хвиль 0,78–1000 мкм. ІЧ-випромінювання класифікують за трьома категоріями:

ближній інфрачервоний (0,75–2,5 мкм), середній інфрачервоний (2,5–25 мкм) і далекий інфрачервоний діапазон (25–1000 мкм). ІЧ-енергія від випромінювача включає різні довжини хвилі і кожна довжина хвилі залежить від кількох чинників, включаючи, температуру та коефіцієнт випромінювання випромінювача [1, 2, 3]. Технологія залежить від потенціалу джерел ІЧ-випромінювання, якими є спеціальні електричні лампи та керамічні або металеві панелі, що нагріваються від електроенергії або газу. Джерело взаємодіє з внутрішньою структурою зразка і таким чином підвищується його температура і сприяє випаровуванню вологи. Відмінною особливістю ІЧ-сушіння є те, що воно може передавати енергію від джерело до зразка без середовища і зразок можна розглядати як поглинач ІЧ-випромінювання для здійснення процесу сушіння.

Завдання щодо вирішення енергозберігаючих заходів при збереженні продукту високої якості є досить складним. Наприклад, процес сушіння, що протікає із застосуванням короткохвильового діапазону довжини хвиль, вартість переробки зменшується, але відбувається прискорення реакцій, що сприяють зниженню якості продукту, тому, виявлення залежності між якістю продукту та енергетичною ефективністю технологічного процесу відіграє велику роль в організації процесу. Тому доцільно здійснювати комбінування ІЧ-випромінювання з іншими способами тепло- та масо обміну.

Наприклад, збільшення кінетики сушіння можливо спостерігати при поєднанні ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням. Сублімаційна сушка інфрачервоним імпульсним струменем скорочує час обробки сировини на 8–30%, а загальна економія енергії на 15–36% порівняно з традиційним сушінням. Вплив інфрачервоної сублімаційної сушки на банани виявився ефективним та не лише покращив ефективність сушіння сировини, а й заощадив понад 70% часу та електроенергії (2,7 кВт/м²) [10]. Сублімаційне сушіння в середньому інфрачервоному діапазоні має найшвидшу швидкість висихання, заощадивши від 14,3 до 42,9%. Результати показали, що безперервне ІЧ-випромінювання не тільки зменшує споживання електроенергії на 42% у порівнянні зі звичайним сушінням, а й зменшує час сушіння від 691 ± 19 хв до 309 ± 32 хв.

На сьогодні процес сушіння має враховувати не тільки кінцеву якість продукції, а й застосовувати енергозберігаючі технології, застосування яких є найбільшою перешкодою для обмеження просування та використання нової технології сушіння, задля скорочення споживаємої енергії та вартості. Зберегти зовнішній вигляд і якість продукту, скоротивши час і енергоспоживання процесу сушіння стало найважливішим у процесі виробництва сушеної продукції. Оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини наведено на рисунку 2.2. Процес реалізації можна розділити на три основних складника:

- енергозберігаючі технології (використання відновлювальних джерел енергії, переривчасті режими, перегріта пара, рідкі теплоносії);
- кінетичні методи (інтенсифікація зовнішнього тепло- масообміну, інтенсифікація внутрішнього тепло- масообміну, кінетична оптимізація);
- теплотехнологічні способи (переривчасті режими, конструктивно-технологічні).

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22



Рисунок 2.2 – Оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини

Якість кінцевого продукту, а також технологічність його отримання повинні бути на одному рівні з економією енергоресурсів. Це вимагає застосування нових досягнень у сфері екології, дбайливого ставлення до ресурсів, впровадження ресурсоефективних інновацій. Для інфрачервоного сушіння головним фактором, що впливає на якість кінцевої сировини є довжина хвилі випромінювання ІЧ-генератора. Неузгодженість оптичних властивостей випромінювача зі спектральними характеристиками сировини, що опромінюється, призводить до незворотних хімічних реакцій та втрати якості. Тому, при виборі довжини хвилі випромінювання для сушіння сировини слід враховувати те, що вода в продукті повинна мати максимальну поглинальну здатність при заданому максимумі довжини хвилі випромінювання, тоді як корисні компоненти сухої речовини при цій же довжині хвилі випромінювання повинні володіти максимальною пропускнуою здатністю. Тому, ефективність процесу сушіння сировини ІЧ-випромінюванням залежить не тільки від узгодження оптичних властивостей випромінювача та спектральних характеристик сировини, що опромінюється, але і від їх правильного вибору та заходів енергетичної ефективності.

Запропоновано умови для оптимізації процесу сушіння плодовоовочевої сировини.

1. Встановлення гнучкого зв'язку між способами сушіння та властивостями овочевої сировини. Різні високоєфективні технології сушіння мають свої переваги і недоліки у зневодненні, що по-різному впливають на властивості фруктів та овочів. Це вимагає при сушінні враховувати фізико-хімічні характеристики сировини, відповідності різних фруктів та овочів умовам обробки, а також встановленню актуальності застосованої технології в процесі сушення для оптимізації здійснення сушіння продукту до його максимуму. Наприклад, мікрохвильова та ультразвукова сушка може призводити до нерівномірного сушіння, а при інфрачервоному випромінюванні

сировина може сильніше втрачати колірні показники. Знаходження правильного методу для різної сировини має велике значення для збереження якості харчових продуктів.

2. Застосування технологій штучного інтелекту. Технологія штучного інтелекту може усунути деякі недоліки у процесі сушіння та допомогти краще зрозуміти кінетику сушіння. Застосування штучного інтелекту в основному включає алгоритми, нейронні мережі, комп'ютер бачення. Використання алгоритмів дозволить прогнозувати моделі сушіння, які сприятимуть глибокому розумінню процесу сушіння та можливості удосконалення параметрів сушіння. Комп'ютерний зір уможливило зможу застосувати спостереження за змінами кольору та форми плодовоовочевої сировини під час процесу сушіння та отримати фотографії висушених зразків у реальному часі. Технологія електронного носа забезпечить можливість здійснювати моніторинг та аналіз, які відбуваються у сировині, а саме зміни смаку та летких сполук у зразках під час сушіння. Наприклад, технологію електронного носу доцільно застосувати у процесі здійснення аналізу зміни летких сполук у речовині під час процесу сушіння кавових зерен. Використання штучного інтелекту при сушінні овочів і фруктів може дати нові інструменти для покращення якості сушеної сировини.

3. Комбінування декількох методів сушіння. Використання інфрачервоних сушарок може вирішити проблеми, які пов'язані зі звичайними сушарками. Використання інфрачервоної енергії для харчових продуктів має багато переваг, таких як менший час сушіння, висока енергоефективність, висока якість продуктів, рівномірна температура та менша потреба в потоці повітря через продукт. Незважаючи на те, що інфрачервона сушка має багато переваг її промислове застосування все ще стикається з деякими проблемами. Наприклад, інфрачервона проникність слабка, що ускладнює сушіння фруктів і овочів на пізніх стадіях, що потребує поєднання ІЧ-сушки з іншими методами сушіння у виробництві для кращого досягнення економії енергії. Наприклад, ІЧ-випромінювання з сублімаційним сушінням, ІЧ-сушіння та сушіння гарячим повітрям, інфрачервоне та вакуумне сушіння, інфрачервоне та мікрохвильове сушіння. З огляду на переваги та недоліки існуючого сушильного обладнання, вибір комбінованих методів сушіння є важливим для покращення якості та швидкості сушіння плодовоовочевої сировини, що потребує зрозуміння точка переходу між кожною технологією та оптимальними умовами контролю.

4. Оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини. Ефективність процесу сушіння сировини ІЧ-випромінюванням залежить не тільки від узгодження оптичних властивостей випромінювача та спектральних характеристик сировини, що опромінюється, але і від їх правильного вибору та заходів енергетичної ефективності.

2.2 Удосконалення комбінованої інфрачервоно-конвективної сушарки

Процес сушіння в харчовій промисловості дуже важливий, оскільки забезпечує видалення вологи з продукту, запобігає утворенню шкідливих

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

мікроорганізмів шляхом досягнення рівномірної вологості по всій сировині. Сушка є одним із найбільш інтенсивних та енергоємних процесів, що здійснюється при високій температурі. Ефективність процесу та якість отриманої сировини є важливими параметрами через високу вартість енергії та витрати на обслуговування обладнання.

Окрім того, необхідно у процесі оптимізації враховувати кінетику сушіння. Перший період процесу сушіння пов'язаний зі швидкістю поверхневого видалення вологи у всьому обсязі сировини, що висушується. Час перехідного процесу залежить в цей період від низки зовнішніх впливів таких як: температура нагрівання генератора випромінювання, динаміки нагріву сировини, максимальної щільності потоку випромінювання, а також не маловажний вплив має відстань між поверхнею випаровування та генератором ІЧ-випромінювання.

Другий період процесу сушіння проходить з падаючою швидкістю видалення вологи. Як правило, це викликано зростанням поверхневої температури сировини, що призводить до впливу градієнта температури у бік гальмування процесу виділення вологи. Спочатку відбувається поверхневий нагрів сировини, що призводить до більш високої швидкості сушіння протягом короткого періоду. Потім відбувається більш тривала швидкість падіння, оскільки швидкість висихання безперервно зменшується з часом і вмістом вологи. 1-й показник падіння з'явився завдяки швидшому видаленню вологи з вільної поверхні, а 2-й показник падіння настав, коли поверхня перестала бути вологою.

Визначення діапазонів температур нагріву сировини у процесі її опромінення, згідно періодів сушіння, має важливе значення, оскільки процес зневоднення пропорційний втраті якості (поява залишкових деформацій, погіршення смакових якостей, а також поживних та біологічних властивостей) та збільшення енерговитрат за рахунок зростання теплового потоку. Динамічні характеристики нагрівання в обох періодах сушіння можна віднести до основних характеристик, оскільки постійна часу визначає характер нагріву сировини, яка у свою чергу залежить від оптико-геометричних, фізико-хімічних характеристик продукту, що визначає швидкість перехідного процесу.

Використання нових технологій, таких як сушіння з комбінуванням конвекції та випромінювання є необхідними для збільшення швидкості сушіння та здійснення енергозбереження у процесі сушіння плодовоовочевої сировини. Сушіння гарячим повітрям є однією з найбільш широко використовуваних технологій сушіння завдяки простоті використання, низькій вартості, легкому управлінню. Однак, під час процесу сушіння сировина піддається впливу високих температур, що може спричинити поверхневе затвердіння, потемніння та інші явища, а коли швидкість висихання низька, якість продукту змінюється [9, 10, 11]. Основа технології конвективного сушіння полягає у продуванні шару матеріалу нагрітим повітрям, так званім агентом сушіння. Діапазон температур знаходиться в межах 80-90°C і на першому етапі процес йде ефективно, проте швидкість зневоднення з наростанням температури біля поверхні помітно скорочується, а енергоємність відповідно неконтрольовано зростає. Наслідок динамічного погіршення тепло- і масо-обміну в значній мірі

									Арк.
									25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ				

впливає на процес висихання сировини. Навколишнє середовище та конструкції апаратів схильні до нагрівання енергією, не сприйнятою поверхнею матеріалу. Втрати зростають, помітної інтенсифікації процесу сушіння немає.

Інфрачервона сушка більш вигідна, оскільки забезпечує більш швидке сушіння сировини, але при цьому споживає більше енергії. Інфрачервона сушка має більше переваг з точки зору якості кінцевої продукції та швидкості сушіння. Враховуючи низьку вартість сушіння гарячим повітрям, простоту експлуатації та можливість масового виробництва в поєднанні з перевагами високої ефективності випромінювання, більш швидкого нагріву, доцільно використовувати технологію інфрачервоного нагріву та сушіння.

Інфрачервоне і гаряче повітряне сушіння можуть поєднуватися і доповнювати один одного. Тому поєднання ПЧ-системи з системою сушіння гарячим повітрям є ефективним і швидким методом сушіння порівняно з використанням будь-якого з них окремо. Комбінована система має такі переваги, як висока якість висушених продуктів і хороші характеристики сушіння, бо тепломасообмін відбувається краще, що призводить до зменшення часу сушіння, зниження споживання енергії та підвищення енергоефективності.

У процесі інфрачервоного сушіння електромагнітні хвилі потрапляють на поверхню сировини, що призводить до появи енергії в продукті у вигляді руху електронів, коливань і обертання атомів і молекул. Підвищення внутрішньої температури пов'язано з випромінюванням червоної хвилі, яка викликає вібрацію молекул і атомів. Тертя, яке викликає ця вібрація генерує тепло і внутрішня температура буде підвищуватися. Ця важлива перевага інфрачервоного сушіння полягає в тому, що енергія просто нагріває продукт і не має сильного впливу на навколишнє середовище. Таким чином, витрати енергії буде значно зменшені.

Використання джерела інфрачервоного випромінювання є одним із нових методів підвищення якості продукції та швидкості сушіння. Хоча інфрачервоне сушіння є новим перспективним підходом, але не може бути застосовано для всіх процесів сушіння, оскільки його проникаюча здатність обмежена. Тому поєднання двох конвекційних (гаряче повітря) і радіаційних механізмів теплообміну важливо для підвищення теплової ефективності сушарок. При поєднанні означених методів можливо досягнуто вищої якості кінцевої продукції та більшої енергоефективності.

Інфрачервоно-конвективна сушарка складається з таких компонентів: інфрачервона сушарка, центробіжний вентилятор, електродвигун (рис. 2.3). Інфрачервона область знаходиться між видимою та мікрохвильовою областями електромагнітного спектру. Інфрачервоні хвилі мають довжину хвилі від 0,75 до 1000 мкм. ПЧ-випромінювачі можна розділити на три різні категорії: ближній інфрачервоний діапазон, середній інфрачервоний та далекий інфрачервоний діапазон, що відповідають довжині хвилі 0,75–2 мкм, 2–4 мкм і 4–1000 мкм. Вплив електромагнітного випромінювання на поверхню висихаючої сировини викликає зміни в електронних, обертальних і коливальних станах атомів і молекул [2, 10]. Різний тип довжини хвилі електромагнітного випромінювання має різний механізм нагріву. Механізмом нагрівання ПЧ-випромінювання є зміни коливального стану молекули в речовині. Коли матеріали поглинають

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

енергію ІЧ-випромінювання складові молекули коливатимуться на частоті 60000–150000 МГц. Виникнення міжмолекулярного тертя призводить до внутрішнього нагрівання всередині сировини, у якій температура поверхні зростає швидко, що набагато швидше, ніж що при теплообміні кондукцією та конвекцією.

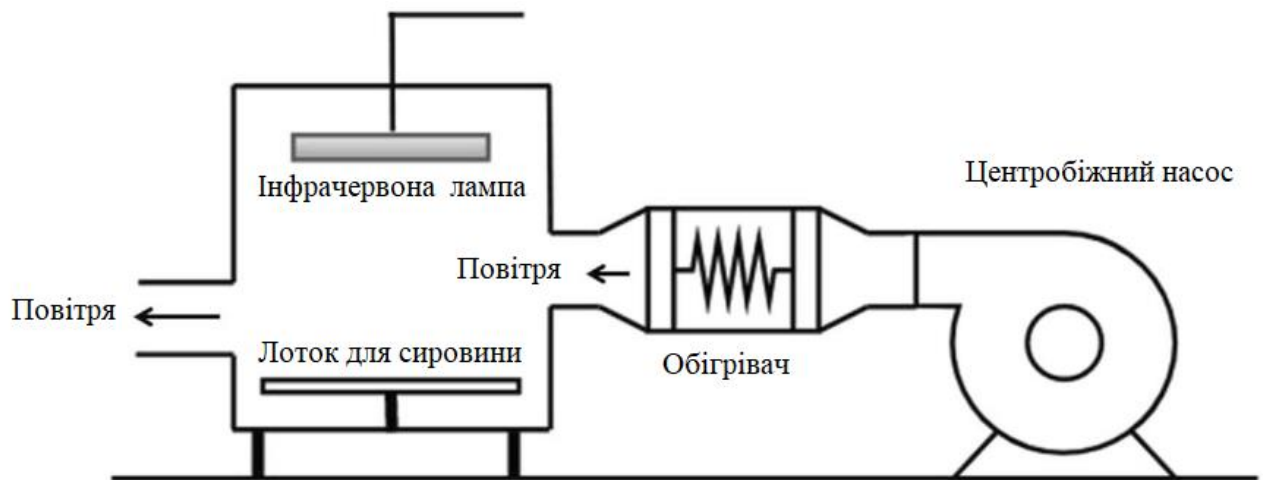


Рисунок 2.3 – Комбінована інфрачервоно-конвективна сушарка

Ефективність кожної ІЧ-системи в основному залежить від типу її джерела тепла. Оскільки інфрачервона енергія буде перетворюватися на тепло, коли сировина поглинає випромінювання, необхідно, щоб джерело тепла (ІЧ-випромінювач) було обрано так, щоб діапазон його випромінювання мав найбільшу швидкість поглинання [2, 8, 10]. Результати показують, що поглинання інфрачервоного випромінювання харчовими продуктами відбувається найсильніше в діапазоні хвиль від 2,5 до 3 мкм. Тому довжину хвилі джерела інфрачервоного випромінювання в інфрачервоній сушарці пропонуємо обрати від 2,4 до 3 мкм (середній інфрачервоний діапазон, який буде доречним для сушіння яблучної сировини), відстань 70 см від джерела інфрачервоного випромінювання.

Схему удосконаленої інфрачервоної сушарки наведено на рисунку 2.4. Температуру повітря, вологість повітря, температуру сушильної камери та швидкість повітря можна змінювати в межах відповідного діапазону. Вхідна потужність інфрачервоної лампи (джерела тепла) становила 1,5 кВт. Для вимірювання температури сушильної камери пропонується застосовувати датчик PT100 (DIN 60751) та контролер температури в сушарці (Autonics, TC4Y-14R). Одним з параметрів, що впливає на умови сушіння продукту є кількість інфрачервоного випромінювання, яке виробляє інфрачервоне джерело. Інтенсивність цього випромінювання фактично є вихідною тепловою енергією джерела інфрачервоного випромінювання. Параметр (інтенсивність) запропоновано регулювати шляхом збільшення або зменшення вхідної напруги лампи за допомогою відповідного обладнання – диммер (регулятор потужності).

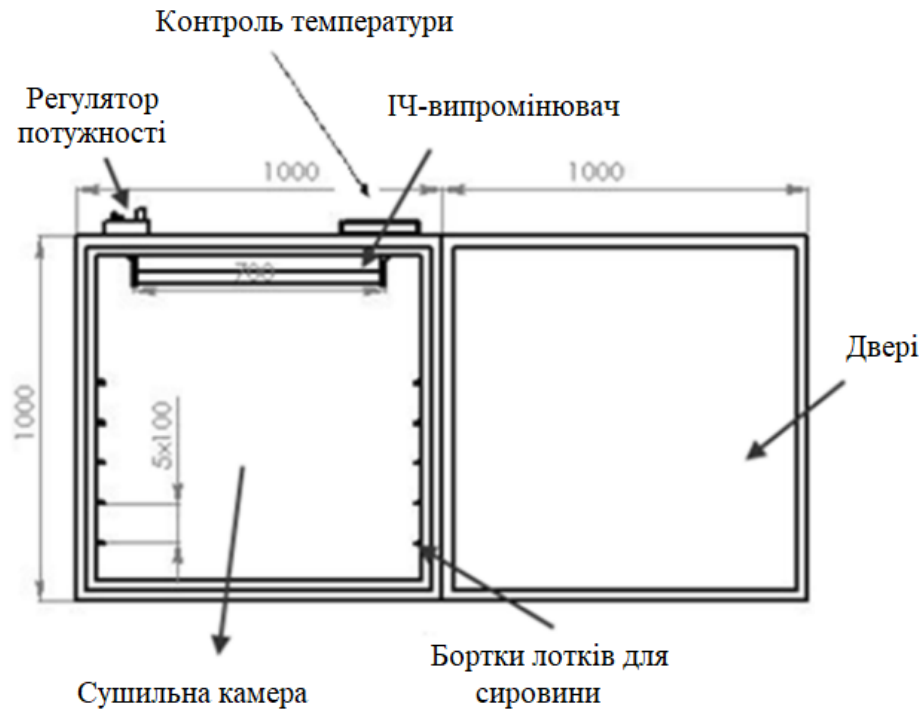


Рисунок 2.4 – Контроль температури в інфрачервоній сушарці

Контроль відповідних параметрів забезпечить можливість зміни температури повітря, вологості повітря, температури сушіння та швидкості повітря в межах запропонованого середнього інфрачервоного діапазону.

Температура сушіння. Висихання прямо пропорційне кількості інфрачервоного випромінювання. Збільшення потужності інфрачервоного випромінювання може спричинити швидке підвищення температури на поверхні продукту, що спричинить збільшення водяного тиску пари всередині продукту і, таким чином, збільшення швидкості сушіння.

Швидкість повітря. Час висихання може бути скорочено за рахунок збільшення швидкості сушильного повітря, що пов'язано зі збільшенням випаровування вологи з поверхні виробу на низьких швидкостях. З іншого боку, перевищення швидкості повітря збільшить час висихання. Це відбувається через охолоджуючий ефект і зниження температури на поверхні продукту внаслідок вищих значень швидкості повітря. Таким чином, він знижує тиск пари і зменшує кількість втрат вологи.

Температури повітря. Кількість зменшеної вологи зростає з підвищенням температури повітря на вході, відповідно, час сушіння зменшується.

Вплив відстані від джерела інфрачервоного випромінювання. Збільшуючи відстані між сировиною та інфрачервоною лампою, час висихання збільшиться через зменшення тепла, яке переноситься на продукт. ІЧ-випромінювання може поширюватися в сировину без середовища та нагрівання навколишнього повітря. Важливими перевагами інфрачервоного випромінювання є запобігання втратам енергії та збереження якості продукту сушіння. ІЧ-випромінювання має конкретну глибину проникнення.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Інтенсивність випромінювання всередині матеріалу досягає значення приблизно 37% від свого значення при поверхні.

Основні характеристики регулятора потужності (вхід: 220В, вихід: 0–220 В), зміна потужності і вихід інтенсивність випромінювання, зміна вхідної напруги на лампу і контактор (вхід: 12В постійного струму, 1А, вихід: 240В змінного струму, 15А). Підтримання постійної температури в камері з увімкненим та вимкненим електричним струмом через лампу. Електрична схема, яка використовується в інфрачервоно-конвективній сушарці показана на рисунку 2.5.

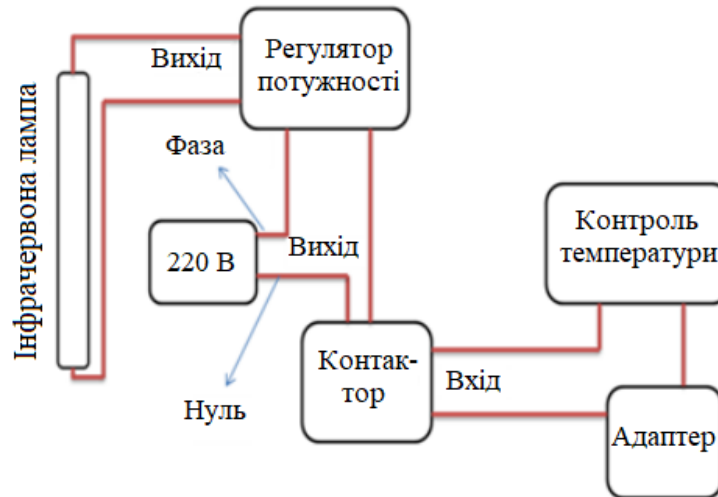


Рисунок 2.5 – Електрична схема, яка використовується в інфрачервоно-конвективній сушарці [6]

Вологість матеріалу можна розрахувати розділивши кількість води на вагу матеріалу (волога речовина або суха речовина), які називаються відповідно вологою на основі сухого вмісту та на основі вологого вмісту [9]

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d}$$

$$M_w = \frac{W_w - W_d}{W_w}$$

де M_d – вологість сухої сировини;

M_w – вологість вологої сировини;

W_w – вага зразків під час процесу сушіння;

W_d – вага висушеного продукту.

Вміст води дорівнює [9]

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

де M_0 – вихідна вологість (кг води/кг сухої речовини);

M_e – рівноважний вміст вологи (кг води/кг сухої речовини);

M_t – вміст вологи в будь-який час (кг води/кг сухої речовини).

Ефективна технологія сушіння має забезпечувати таким вимогам, як висока швидкість висихання, необхідний кінцевий вміст вологи, відповідний колір, зовнішній вигляд, смак, тривалий термін зберігання та високий вміст інгредієнтів у сушеному вигляді, а також низьке енергоспоживання. Поєднання двох конвекційних (гаряче повітря) і радіаційних механізмів теплообміну важливо для підвищення теплової ефективності сушарок. При поєднанні означених методів можливо досягнуто вищої якості кінцевої продукції та більшої енергоефективності.

На основі вище зазначеного можна вважати, що для інфрачервоного сушіння головним фактором, що впливає на якість кінцевої сировини є довжина хвилі випромінювання ІЧ-генератора. Неузгодженість оптичних властивостей випромінювача зі спектральними характеристиками сировини, що опромінюється, призводить до незворотних хімічних реакцій та втрати якості. Тому ефективність процесу сушіння сировини ІЧ-випромінюванням залежить не тільки від узгодження оптичних властивостей випромінювача та спектральних характеристик сировини, що опромінюється, але і від їх правильного вибору та заходів енергетичної ефективності.

Запропоновано умови оптимізації процесу сушіння плодовоовочевої сировини: встановлення гнучкого зв'язку між способами сушіння та властивостями овочевої сировини, застосування технологій штучного інтелекту, комбінування декількох методів сушіння, оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини.

Удосконалено процес сушіння плодовоовочевої сировини шляхом поєднання двох конвекційних (гаряче повітря) і радіаційних механізмів теплообміну для підвищення теплової ефективності сушарок. При поєднанні означених методів можливо досягнуто вищої якості кінцевої продукції та більшої енергоефективності. Довжину хвилі джерела інфрачервоного випромінювання в сушарці пропонується обрати від 2,4 до 3 мкм (середній інфрачервоний діапазон, який буде доречним для сушіння яблучної сировини), відстань 70 см від джерела інфрачервоного випромінювання.

Температуру повітря, вологість повітря, температуру сушіння та швидкість повітря можна змінювати в межах відповідного діапазону. Вхідна потужність інфрачервоної лампи (джерела тепла) становила 1,5 кВт. Для вимірювання температури сушильної камери пропонується застосовувати датчик PT100 (DIN 60751) та контролер температури в сушарці (Autonics, TC4Y-14R). Одним з параметрів, що впливає на умови сушіння продукту є кількість інфрачервоного випромінювання, яке виробляє інфрачервоне джерело. Інтенсивність цього випромінювання фактично є вихідною тепловою енергією джерела інфрачервоного випромінювання. Параметр (інтенсивність) запропоновано регулювати шляхом збільшення або зменшення вхідної напруги лампи за допомогою відповідного обладнання – диммер (регулятор потужності).

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Харчова цінність яблук і користь для здоров'я

У світі налічується 7500 сортів яблук, які різняться за кольором (від червоного до рожевого та від зеленого до золотистого), смаком (від солодкого до кислого) і текстурою (від м'якої до хрусткої). Розмір яблук може варіюватися від маленьких, як велика вишня, до великих, як грейпфрут. Одне яблуко середнього розміру (200 г) містить 104 калорії, 0,5 грама білка, 27,6 грама вуглеводів і 0,3 грама жиру [4]. Яблука також містять клітковину, калій і вітамін С. Червоні, зелені або інші сорти яблук дуже схожі за своїми поживними властивостями, лише з дуже незначними відмінностями в калоріях, клітковині тощо:

- калорії: 104;
- жирів: 0,3 г;
- натрію: 2 мг;
- вуглеводів: 27,6 г;
- клітковини: 4,8 г;
- цукру: 20,8 г;
- білка: 0,5 г;
- калію: 214 мг;
- вітаміну С: 9,2 мг;
- вітаміну А: 6 мкг.



Яблука значно відрізняються за розміром, але загалом це низькокалорійна, багата поживними речовинами їжа, що містить клітковину та мікроелементи такі як калій і вітамін С. Розглянемо переваги вживання яблук:

- сприяє здоров'ю серця завдяки високому вмісту калію та натрію;
- регулює рівень цукру в крові завдяки високого вмісту клітковини;
- забезпечує протираковий захист за допомогою антиоксидантів, таких як кверцетин;
- може полегшити симптоми астми за допомогою кверцетину;
- допомагає підтримувати здоровий баланс ваги, насичуючи клітковиною та поживними речовинами.

Яблука – це рослинна їжа з природним низьким вмістом натрію та високим вмістом калію, що запобігає небезпечному підвищенню артеріального тиску. Яблука є гарним джерелом клітковини, яка, як відомо, знижує рівень холестерину. Вони містять численні протизапальні сполуки, які знижують загальний ризик серцевих захворювань. Клітковина, що міститься в яблуках, уповільнює травлення, запобігаючи швидкому підвищенню рівня цукру в крові

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ			
Розроб.	Септа				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Цвіркун						31	6
Н. Контр.	Омельченко				ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО			
Затверд.	Цвіркун							

після їжі. Вживання яблук зі шкіркою забезпечує організм великою кількістю клітковини (яблучний сік не містить клітковини). Крім свіжих яблук, яблучні продукти включають: яблучне пюре, яблучний сік, яблучний сидр, яблучний оцет і сушені яблучні скибочки. Сушені або зневоднені яблука відносяться до плодів яблук з яких видалено початковий вміст води. Вони виглядають як злегка підрум'янені, тонко нарізані версії свіжих яблук. Сушені яблука часто виробляються в промислових масштабах, але їх також можете зробити власноруч. Сушка яблук – один з найдавніших і простих способів збереження плодів. Деякі способи сушіння яблук включають в себе наступні технології: сушка на сонці, застосування дегідрататора, сушка через духовку.

3.2 Дослідження різних методів сушіння яблучної сировини

Сушка є одним з найважливіших методів, що застосовуються для зберігання яблук. Яблучні скибочки можна сушити за допомогою ІЧ-випромінювання та конвекції в еквівалентних умовах. Кінетика ІЧ-сушіння залежить від відстані між випромінювачами і опроміненої теплою поверхні й швидкості повітря. Опромінена теплою поверхня випаровує набагато більше води, ніж та, яка не нагрівається ІЧ-енергією, поки з матеріалу не буде видалено 80% води [5]. Методом інфрачервоного сушіння в поєднанні з попередньою сушкою гарячим повітрям можна заощадити 20% часу сушіння в порівнянні з тільки ІЧ-сушінням. Щоб покращити ІЧ-властивості сушіння та змінити колір яблучних скибочок і скоротити час сушіння доцільно застосовувати короткохвильовий та середньохвильовий ІЧ-випромінювач.

Технологічні та якісні властивості яблучних скибочок при одночасному ІЧ-сухому бланшуванні та дегідrataції з постійним нагріванням показали, що висока інтенсивність випромінювання залежить від товщини скибочок. Так, тонкі скибочки мали швидше підвищення температури, а також швидше видалення вологи, ніж товсті скибочки, які мали низьку інтенсивність випромінювання і, відповідно, повільніше видалення вологи [5]. Одночасне ІЧ-бланшування і дегідrataція з безперервним нагріванням можуть бути використані як альтернатива нинішнім методам обробки для отримання високоякісних бланшованих і частково зневоднених фруктів і овочів.

Для порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок здійснено процес сушіння за допомогою різних методів: у духовці, за допомогою дегідрататора, використовуючи інфрачервону електричну сушарку. Виробництво сушених яблук умовно поділимо на три основні стадії: підготовчі операції, сушіння та операції з готовою сировиною. Технологічна схема виробництва сушених яблук наведено на рисунку 3.1.

Підготовчі операції включають: мийку, сортування, нарізання, підготовку сировини до сушіння.

Сушіння: прогрів сушильної камери, завантаження сировини, процес сушіння, витримка.

Процеси з готовою сировиною: вивантаження сировини, сортування, зважування, пакування, зберігання.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

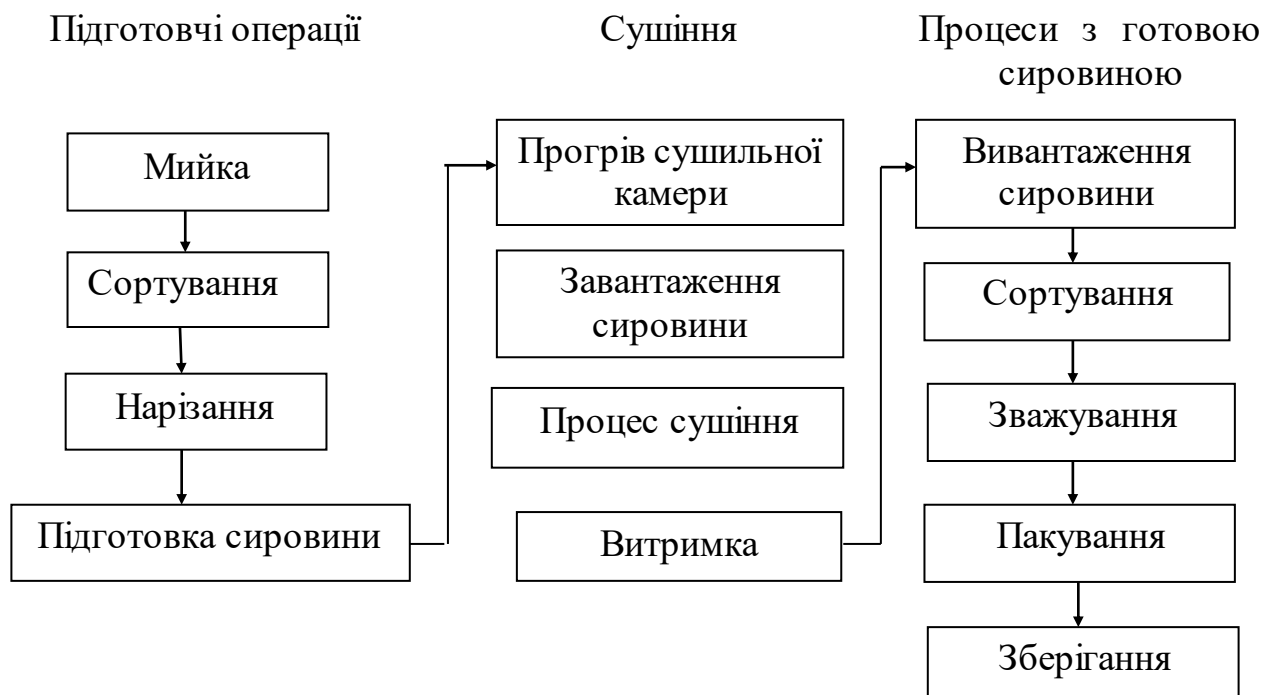


Рисунок 3.1 – Технологічна схема виробництва сушених яблук

1. Яблучні скибочки сушені в духовці (рис. 3.2).

Для сушіння яблучних скибочок в духовці здійснено наступні операції:

- розігріємо духовку до 70°C–80°C. Встановимо на найнижчу можливу температуру, бо якщо температура буде не прийнятною то необхідно буде кілька разів перевіряти яблука на підгоряння;
- вимиємо яблука, нарежемо їх дуже тонкими скибочками та залишимо серцевини в яблуках, але видалимо насіння та нарежемо скибочками;
- обробимо скибочки лимонним соком, щоб запобігти потемнінню;

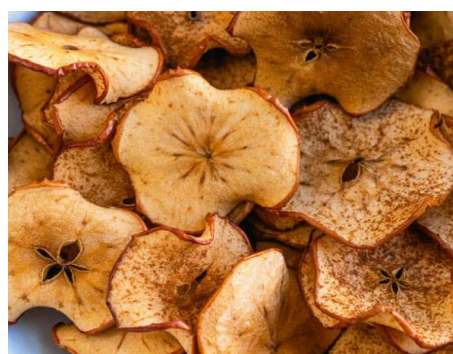


Рисунок 3.2 – Яблучні скибочки сушені в духовці

- застелимо деко пергаментним папером та розкладемо оброблені яблучні скибочки в один шар для запікання (за бажанням можна посипати корицею);
- запечемо яблука при низькій температурі в духовці кілька годин, поки вони не висохнуть і не стануть відповідної якості.

Сушимо від 1 до 2 годин поки яблука злегка не підрум'яняться при мінімальній температурі. Чіпси стануть хрусткими після охолодження протягом декількох хвилин (щоб перевірити чи готові сушені яблучні чіпси витягаємо їх

з духовки, охолоджуємо кілька хвилин, а потім спробуємо їх на хрусткість). Зберігаємо яблучні чіпси в закритому контейнері або банці при кімнатній температурі близько 2 тижнів.

Сушіння гарячим повітрям досить тривале. Через низьку температуру електропровідність та тепловіддача у продукті під час нагрівання обмежена. Температура сушіння та товщина скибочок має значний вплив на процес сушіння. Залежність температури сушіння від часу сушіння наведено на рисунку 3.3.

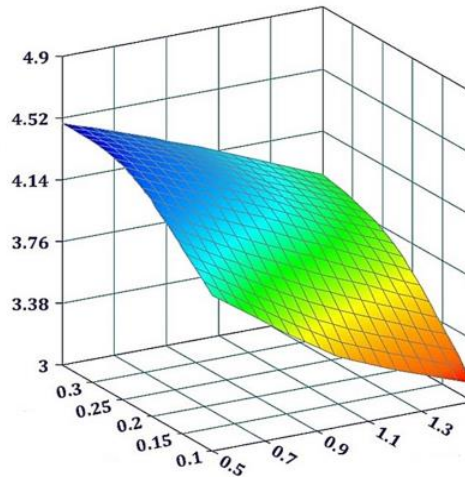


Рисунок 3.3 – Залежність температури сушіння від часу сушіння

2. Яблучні скибочки сушені в дегідраторі (рис. 3.4).

Для сушіння яблучних скибочок в дегідраторі здійснено наступні операції:

- наповнимо миску холодною водою і 1/4 склянки лимонного соку;
- очистимо яблука від шкірки, серцевини і тонко наріжемо;
- поміщаємо скибочки в суміш води та соку;
- розкладемо скибочки на лотках дегідратора так, щоб навколо кожної скибочки залишався простір, а скибочки не торкалися одна одної;
- встановимо дегідратор на режим «фрукти/овочі» (60°C) і сушимо протягом 4-8 годин повертаючи лотки кожні кілька годин;



Рисунок 3.4 – Яблучні скибочки сушені в дегідраторі

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

– тривалість часу, який необхідний для висихання, залежить від того, скільки лотків одночасно готується і наскільки товсті скибочки яблук.

Яблука готові, коли вони перестають бути вологими. Деякі яблука можуть приготуватися раніше за інші, тоді їх необхідно вийняти, а інші продовжувати сушити в дегідраторі при заданій температурі поки вони не стануть сухими і підрум'яненими. Слід зазначити, що спроба прискорити процес, нарізавши надто тонкі скибочки, матиме негативні наслідки. Шматочки мають бути досить тонкими, щоб вони висохли, але якщо вони будуть занадто тонкими є ризик, що вони підгорять і стануть занадто хрусткими та ламкими. Такі скибочки яблук можуть прилипати до лотка дегідратора тому, щоб скибочки яблук були хрусткими, але все ще злегка податливими необхідно, щоб шматочки були відповідної товщини. Залежність температури сушіння від часу сушіння наведено на рисунку 3.5.

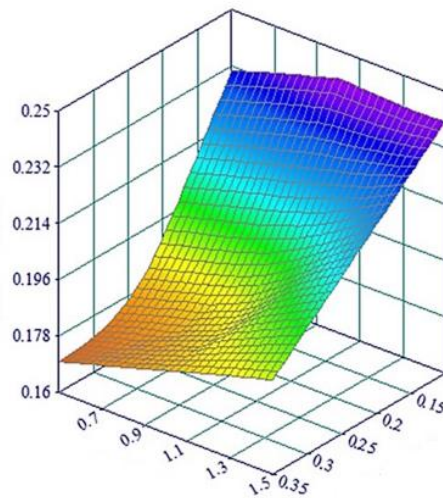


Рисунок 3.5 – Залежність температури сушіння від часу сушіння

Розглянуті методи сушіння вимагають багато часу, тому, бажання здійснювати швидко та ефективну теплову обробку призвело до збільшення використання таких методів, як мікрохвильова та інфрачервона сушка.

3. Яблучні скибочки сушені з використанням інфрачервоної електричної сушарки для овочів (рис. 3.6). Технічні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики інфрачервоної електричної сушарки

Технічні характеристики	Показник
Номінальна напруга, U_n	12-220В, 380В, 50Гц
Питома потужність	до 500 Вт/м ²
Номінальний струм навантаження, I_n	від 0,5 до 2,3 А/м ²
Діапазон довжини хвилі випромінювання, λ	8,5-9,5 мкм
Ширина полотна	0,51 м
Розмірний ряд за довжиною	від 0,5 до 7 м
Наявність передаючого елемента	алюмінієва фольга

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 3.6 – Яблучні скибочки сушені з використанням інфрачервоної електричної сушарки

Використання технології інфрачервоного випромінювання при сушінні яблучних чіпсів має низку переваг, а саме: зменшення часу висихання, високу енергоефективність, високу якість готової продукції, рівномірний температурний режим. Залежність температури сушіння від часу сушіння наведено на рисунку 3.7.

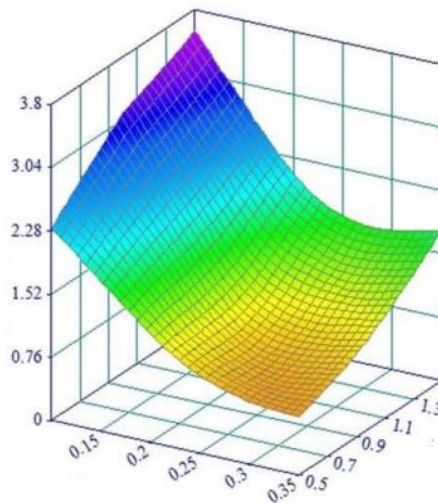


Рисунок 3.7 – Залежність температури сушіння від часу сушіння

Для порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок здійснено процес сушіння за допомогою різних методів: у духовці (№1), за допомогою дегідратора (№2), використовуючи інфрачервону електричну сушарку (№3). Якісні показники яблучних скибочок отриманих при застосуванні різних методів сушіння представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Якісні показники сушених яблучних скибочок

Обладнання	Найменування показника	Характеристика
	Зовнішній вигляд	Шматочки неправильної форми, що легко ідентифікуються як скибочки яблук, не злипаються, однорідні за забарвленням та формою, без плям та інших дефектів на поверхні, механічних пошкоджень; без поверхневої вологості.

№1	Колір	Золотаво-коричневий, однорідний, насичений, яскравий.
	Запах та смак	Приємний, кислувато-солодкий, характерний для яблучної сировини, яскраво виражений, без стороннього запаху та присмаку.
	Консистенція/ текстура	Пластична, в міру ламка.
№2	Зовнішній вигляд	Шматочки неправильної форми, що легко ідентифікуються як скибочки яблук, не злипаються, однорідні за забарвленням та формою, без плям та інших дефектів на поверхні, механічних пошкоджень; без поверхневої вологості.
	Колір	Золотаво-коричневий, однорідний, насичений, яскравий.
	Запах та смак	Приємний, кислувато-солодкий, характерний для яблучної сировини, яскраво виражений, без стороннього запаху та присмаку.
№3	Консистенція/ текстура	Пластична, в міру ламка.
	Зовнішній вигляд	Шматочки неправильної форми, що легко ідентифікуються як скибочки яблук, не злипаються, однорідні за забарвленням та формою, без плям та інших дефектів на поверхні, механічних пошкоджень; без поверхневої вологості.
	Колір	Золотаво-коричневий, однорідний, насичений, яскравий.
	Запах та смак	Приємний, кислувато-солодкий, характерний для яблучної сировини, яскраво виражений, без стороннього запаху та присмаку.

Результати порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок, здійснених за допомогою різних методів показали, що всі зразки мають відповідну якість. Шматочки неправильної форми, що легко ідентифікуються як скибочки яблук, не злипаються, однорідні за забарвленням та формою, без плям та інших дефектів на поверхні, механічних пошкоджень; без поверхневої вологості. Тобто кінцева якість у всіх зразках відповідає показникам якості.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Сушені яблучні скибочки, які було виготовлено трьома різними методами, зберігалися в закритому контейнері при кімнатній температурі близько 2 тижнів. Результати показали, що найтриваліший термін зберігання мав зразок №3, а саме сушіння яблучної сировини за допомогою інфрачервоної електричної сушарки.

На основі вище зазначеного, можна вважати, що яблука – це рослинна їжа з природним низьким вмістом натрію та високим вмістом калію, що запобігає небезпечному підвищенню артеріального тиску. Яблука є гарним джерелом клітковини, яка, як відомо, знижує рівень холестерину. Вони містять численні протизапальні сполуки, які знижують загальний ризик серцевих захворювань. Клітковина, що міститься в яблуках, уповільнює травлення, запобігаючи швидкому підвищенню рівня цукру в крові. Крім свіжих яблук, яблучні продукти включають яблучне пюре, яблучний сік, яблучний сидр, яблучний оцет і сушені яблучні скибочки. Сушені або зневоднені яблука відносяться до плодів яблук з яких видалено початковий вміст води. Вони виглядають як злегка підрум'янені, тонко нарізані версії свіжих яблук. Сушені яблука часто виробляються в промислових масштабах, але їх також можна зробити власноруч.

Для порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок було здійснено процес сушіння за допомогою різних методів: у духовці, за допомогою дегідрататора, використовуючи інфрачервону електричну сушарку.

Результати показали, що сушіння гарячим повітрям досить тривале. Через низьку температуру електропровідність та тепловіддача у продукті під час нагрівання обмежена. Температура сушіння та товщина скибочок має значний вплив на процес сушіння. Спроба прискорити процес, нарізавши надто тонкі скибочки має негативні наслідки. Шматочки мають бути досить тонкими, щоб вони висохли, але якщо вони будуть занадто тонкими є ризик, що вони підгорять і стануть занадто хрусткими та ламкими. Такі скибочки яблук можуть прилипати до лотка дегідрататора тому, щоб скибочки яблук були хрусткими, але все ще злегка податливими необхідно, щоб шматочки були відповідної товщини. Використання технології інфрачервоного випромінювання при сушінні яблучних чіпсів має низьку перевагу, а саме: зменшення часу висихання, високу енергоефективність, високу якість готової продукції, рівномірний температурний режим.

Здійснено порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок, здійснених за допомогою різних методів. Результати показали, що всі зразки мають відповідну якість. Шматочки неправильної форми, що легко ідентифікуються як скибочки яблук, не злипаються, однорідні за забарвленням та формою, без плям та інших дефектів на поверхні, механічних пошкоджень; без поверхневої вологості. Тобто кінцева якість у всіх зразках відповідає показникам якості.

Сушені яблучні скибочки, які було виготовлено трьома різними методами, зберігалися в закритому контейнері при кімнатній температурі близько 2 тижнів. Результати показали, що найтриваліший термін зберігання мав зразок № 3, а саме сушіння яблучної сировини за допомогою інфрачервоної електричної сушарки.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини. У роботі зазначено, плодово-овочева сировина не може довго зберігатися в природних умовах. Тому для продовження терміну придатності потрібні різні методи збереження: сушіння, заморожування, смаження та варіння. Сушіння є дуже важливим, оскільки може зменшити відходи свіжої сировини та надати споживачеві різноманітну овочеву продукцію. Процеси сушіння мають скорочувати час висихання та мінімізувати енергетичні витрати, зберігаючи при цьому високу якість продукції.

На основі аналізу наукових джерел визначено, що за механізмом теплообміну сушіння можна класифікувати на пряме (конвекція), непряме або контактне (кондукція), променисте (випромінювання) і діелектричне або мікрохвильове (радіочастотне) сушіння. Останнім часом удосконалюються технології сушіння: мікрохвильова сушка, сублімаційна сушка, сушка розпиленням, електрична рідинна сушка, вакуумна сушка, інфрачервона сушка, змішана сушка.

Зазначено, що порівняно з традиційним сушінням інфрачервоне сушіння має багато переваг, включаючи рівномірний нагрів, короткий час обробки, високу швидкість теплопередачі, великий тепловий потік, високу енергоефективність і низьку вартість енергії. Це може ефективно скоротити час сушіння фруктів і овочів, підвищити ефективність сушіння та якість фруктів і овочів. Інфрачервоне сушильне обладнання легко модифікується, адаптується, просте, легко поєднується з іншими способами нагріву (конвекційне, вакуумне, мікрохвильове сушіння). У порівнянні з традиційним сушінням гарячим повітрям, основна перевага полягає в тому, що воно має вищу ефективність сушіння, що може ефективно скоротити час сушіння та покращити якість продукції, а саме має переваги на ранніх і середніх стадіях сушіння.

Сконцентровано увагу на тому, що для інфрачервоного сушіння головним фактором, що впливає на якість кінцевої сировини є довжина хвилі випромінювання ІЧ-генератора. Неузгодженість оптичних властивостей випромінювача зі спектральними характеристиками сировини, що опромінюється, призводить до незворотних хімічних реакцій та втрати якості. Тому, ефективність процесу сушіння сировини ІЧ-випромінюванням залежить не тільки від узгодження оптичних властивостей випромінювача та спектральних характеристик сировини, що опромінюється, але і від їх правильного вибору та заходів енергетичної ефективності.

Запропоновано умови оптимізації процесу сушіння плодовоовочевої сировини: встановлення гнучкого зв'язку між способами сушіння та властивостями овочевої сировини, застосування технологій штучного

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки плодово-овочевої сировини	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Септа</i>						39	2
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>							
						ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		

інтелекту, комбінування декількох методів сушіння, оптимізація енергозберігаючих засобів у процесі сушіння сировини.

Удосконалено процес сушіння плодовоовочевої сировини шляхом поєднання двох конвекційних (гаряче повітря) і радіаційних механізмів теплообміну для підвищення теплової ефективності сушарок. При поєднанні означених методів можливо досягти вищої якості кінцевої продукції та більшої енергоефективності. Довжину хвилі джерела інфрачервоного випромінювання в сушарці пропонується обрати від 2,4 до 3 мкм (середній інфрачервоний діапазон, який буде доречним для сушіння яблучної сировини), відстань 70 см від джерела інфрачервоного випромінювання.

Температуру повітря, вологість повітря, температуру сушіння та швидкість повітря можна змінювати в межах відповідного діапазону. Вхідна потужність інфрачервоної лампи (джерела тепла) становила 1,5 кВт. Для вимірювання температури сушильної камери пропонується застосовувати датчик PT100 (DIN 60751) та контролер температури в сушарці (Autonics, TC4Y-14R). Одним з параметрів, що впливає на умови сушіння продукту є кількість інфрачервоного випромінювання, яке виробляє інфрачервоне джерело. Інтенсивність цього випромінювання фактично є вихідною тепловою енергією джерела інфрачервоного випромінювання. Параметр запропоновано регулювати шляхом збільшення або зменшення вхідної напруги лампи за допомогою регулятора потужності.

Проведено дослідження різних методів сушіння яблучної сировини. Сушені або зневоднені яблука відносяться до плодів яблук з яких видалено початковий вміст води. Вони виглядають як злегка підрум'янені, тонко нарізані версії свіжих яблук. Сушені яблука часто виробляються в промислових масштабах, але їх також можна зробити власноруч. Для порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок було здійснено процес сушіння за допомогою різних методів: у духовці, за допомогою дегідрататора, використовуючи інфрачервону електричну сушарку.

Результати показали, що сушіння гарячим повітрям досить тривале. Температура сушіння та товщина скибочок має значний вплив на процес сушіння. Використання технології інфрачервоного випромінювання при сушінні яблучних чіпсів має низку переваг, а саме: зменшення часу висихання, високу енергоефективність, високу якість готової продукції, рівномірний температурний режим.

Здійснено порівняння якісних характеристик сушених яблучних скибочок, здійснених за допомогою різних методів. Результати показали, що всі зразки мають відповідну якість. Шматочки неправильної форми, що легко ідентифікуються як скибочки яблук, не злипаються, однорідні за забарвленням та формою, без плям та інших дефектів на поверхні, механічних пошкоджень; без поверхневої вологості. Тобто кінцева якість у всіх зразках відповідає показникам якості.

Отримані сушені яблучні скибочки зберігалися в закритому контейнері при кімнатній температурі близько 2 тижнів. Результати показали, що найтриваліший термін зберігання мав зразок № 3, а саме сушіння яблучної сировини за допомогою інфрачервоної електричної сушарки.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-20.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Arun S. Mujumdar. Advances in drying science and technology: handbook of drying of vegetables and vegetable products. New York: CRC Press, 2017. 556 p.
2. Priyanka Sakare, Niranjan Prasad. Infrared drying of food materials: Recent Advances. Food Engineering Reviews. 2020. Vol. P. 381–398.
3. Heat source replacement strategy using catalytic infrared: A future for energy saving drying of fruits and vegetables. URL: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1750-3841.16834>
4. Apple nutrition facts and health benefits. URL: <https://www.verywellfit.com/apples-nutrition-facts-calories-and-their-health-benefits-4117992>.
5. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15538362.2019.1616243>.
6. Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини. Х.: ХДУХТ. 2015. 159 с.
7. Снежкін Ю.Ф. Зниження енерговитрат при переробці фруктово-овочевої сировини. Наук. праці ОНАХТ. Одеса, 2006. Вип. 28. С. 71–73.
8. Rasool Sadin, Gholam-Reza Chegini. development and performance evaluation of a combined infrared and hot air dryer. Biol. Environ. Sci., 2014. Vol. 11–18.
9. Effect of combined infrared hot air drying on yam slices: drying kinetics, energy consumption, microstructure, and nutrient composition. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/16/3048>.
10. Novel efficient physical technologies for enhancing freeze drying of fruits and vegetables: A Review. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/23/4321>.
11. Патент на корисну модель 97303 Україна / Радіаційно-конвективна сушильна установка / Дубковецький І.В., Малезик І.Ф., Бурлака Т.В.
12. Бандура В.Н., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О. Сушіння насіння соняшнику в електромагнітному полі // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. № 3(98). С. 63–68.