

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»
_____ Хорольський В.П.
« ____ » _____ 2024 року

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

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОНВЕКТИВНОГО
СУШННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
ТЕПЛООВОГО НАСОСУ»**

Виконав:
здобувач вищої освіти _____ Анпілогов Андрій Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник: _____ зав.кафедри, к.т.н., доцент, Омельченко О.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
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 магістр

Галузь знань Механічна інженерія

Освітня програма Обладнання переробної і харчової промисловості

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробної і харчової промисловості»

Хорольський В.П.
« » 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Анпілогову Андрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу»

Керівник роботи к.т.н., доцент, Омельченко О.В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом першого проректора ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського від «08» травня 2024 р. № 59-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи «09» грудня 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 рослинної сировини.

3. Удосконалення обладнання для конвективного сушіння із системою осушення тепловим насосом.

4. Аналіз результатів досліджень.
5. Висновки.
6. Список використаних джерел.

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

Обладнання для сушіння рослинної сировини.

Системи осушення з тепловим насосом.

Принципова схема сушіння за допомогою теплового насоса для конвективного сушіння.

Модель процесу сушіння із використанням теплового насосу.

6. Дата видачі завдання «1» вересня 2024 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	4.09-20.09.2024 р.
2	Аналіз обладнання для сушіння рослинної сировини	21.09-18.10.2024 р.
3	Удосконалення обладнання для конвективного сушіння із системою осушення тепловим насосом	19.10-08.11.2024 р.
4	Аналіз результатів досліджень	09.11-15.11.2024 р.
5	Висновки по роботі	16.11-22.11.2024 р.
6	Оформлення роботи і подання до захисту	23.11-26.11.2024 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Анпілогов А.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Омельченко О.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура магістерської роботи. Повний обсяг магістерської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 43 сторінок. Робота містить: 1 таблицю, 17 рисунків. Список використаних джерел складається з 25 найменувань.

Об'єкт роботи – сушильні системи з тепловим насосом: високотемпературні та низькотемпературні.

Предмет роботи – процес сушіння рослини сировини із застосуванням теплового насоса.

Мета роботи – удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насоса.

У роботі зазначено, що сушіння з тепловим насосом – це технологія за допомогою якої сировину можна сушити при низькій температурі та в безкисневій атмосфері, використовуючи менше енергії, ніж при звичайних методах сушіння. Тому є перспективною для сушіння рослинної сировини, яка є термічно чутливою до кисню.

На основі аналізу, було зазначено, що для розвитку сталої енергетики необхідні три важливі технологічні зміни: енергетична економія, підвищення ефективності виробництва, енергія та відновлення використання викопного палива за рахунок різних джерел відновлюваної енергії. У зв'язку з цим системи із використанням теплового насоса підвищують енергоефективність і спричиняють меншу витрату викопного палива. Оскільки сушіння за допомогою теплового насоса є низькотемпературним процесом сушіння, він уможливіє подвійну перевагу перед звичайними, поширеними методами сушіння.

Зазначено, що конвективні сушарки характеризуються низькою енергоефективністю, що пов'язано з великими втратами тепла. Одним з перспективних шляхів підвищення теплової ефективності конвективних сушарок є використання такого енергозберігаючого обладнання, як теплові насоси. Запропоновано удосконалену схему конвективного сушіння із додатковою системою осушення тепловим насосом, що сприятиме зменшенню або відновленню відпрацьованого тепла в рамках скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів.

Розроблено модель процесу сушіння для конвективної сушарки, яка працює в постійних умовах сушіння. Система містить два контури: перший використовується для охолодження, а другий для нагрівання сушильного повітря. Система теплового насоса оснащена внутрішнім теплообмінником для підвищення ефективності та контролю процесу. Повітряне охолодження відбувається у випарнику, а нагрівання – в газовому охолоджувачі теплового насоса. Також пропонується моніторинг і контроль отриманих даних. Для цього в сушильній камері встановлені системи контролю температури і вологості в режимі реального часу, а блок управління містить контролер і сенсорний екран. Запропоновано узагальнену схему процесу збору даних сушильного пристрою теплового насоса та блоку управління.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сушіння, тепловий насос, конвективна сушарка, модель, моніторинг, контроль, якість сировини, енергозбереження.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Типи сушарок та їх застосування в харчовій промисловості	7
1.2 Сушіння сировини із використанням теплового насосу	13
1.3 Порівняння ефективності сушильних машин	19
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ІЗ СИСТЕМОЮ ОСУШЕННЯ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ	23
2.1 Стратегія зменшення енергоспоживання та підвищення продуктивності обладнання для сушіння	23
2.2 Удосконалення обладнання для сушіння рослинної сировини	29
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	33
3.1 Якісна характеристика сушеної рослинної сировини	33
3.2 Модель процесу сушіння із використанням теплового насосу	35
ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42
ДОДАТКИ	44

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Анпілогов</i>			Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Омельченко</i>					5	1
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>			ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО			
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що сушіння з тепловим насосом – це технологія за допомогою якої сировину можна сушити при низькій температурі та в безкисневій атмосфері, використовуючи менше енергії, ніж при звичайних методах сушіння. Тому є перспективною для сушіння рослинної сировини, яка є термічно чутливою до кисню. Технологія все частіше використовується в харчовій промисловості завдяки низькому споживанню енергії, меншим втратам якості та високій тепловій ефективності сушіння

Мета та задачі дослідження. Метою магістерської роботи є удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насоса.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що для розвитку сталої енергетики необхідні три важливі технологічні зміни: енергетична економія, підвищення ефективності виробництва, енергія та відновлення використання викопного палива за рахунок різних джерел відновлюваної енергії. У зв'язку з цим системи із використанням теплового насоса підвищують енергоефективність і спричиняють меншу витрату викопного палива. Оскільки сушіння за допомогою теплового насоса є низькотемпературним процесом сушіння, він уможливорює подвійну перевагу перед звичайними, поширеними методами сушіння.

Зазначено, що конвективні сушарки характеризуються низькою енергоефективністю, що пов'язано з великими втратами тепла. Одним з перспективних шляхів підвищення теплової ефективності конвективних сушарок є використання такого енергозберігаючого обладнання, як теплові насоси. Запропоновано удосконалену схему конвективного сушіння із додатковою системою осушення тепловим насосом, що сприятиме зменшенню або відновленню відпрацьованого тепла в рамках скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів.

Розроблено модель процесу сушіння для конвективної сушарки, яка працює в постійних умовах сушіння. Система містить два контури: перший використовується для охолодження, а другий для нагрівання сушильного повітря. Система теплового насоса оснащена внутрішнім теплообмінником для підвищення ефективності та контролю процесу. Повітряне охолодження відбувається у випарнику, а нагрівання – в газовому охолоджувачі теплового насоса. Також пропонується моніторинг і контроль отриманих даних. Для цього в сушильній камері встановлені системи контролю температури і вологості в режимі реального часу, а блок управління містить контролер і сенсорний екран. Запропоновано узагальнену схему процесу збору даних сушильного пристрою теплового насоса та блоку управління.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Аннілогов</i>				Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						6	1
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

1.1 Типи сушарок та їх застосування в харчовій промисловості

Сушіння є ключовим процесом у харчовій промисловості. Велика кількість сировини сушиться для збільшення терміну придатності, зниження вартості упаковки, зниження ваги при доставці, покращення зовнішнього вигляду, збереження оригінального смаку та харчової цінності. Основна мета сушіння полягає в тому, щоб видалити вологу, щоб бактерії, дріжджі та пліснява не могли рости та псувати продукт. У багатьох випадках процес сушіння застосовується до такої сировини як фрукти та овочі, щоб вони могли зберігатися якомога довше та бути доступними поза сезоном.

Сушіння – це одинична операція, яка з давніх часів застосовується в різних галузях промисловості, включаючи харчову промисловість. Процес сушіння необхідний для продовження терміну зберігання харчових продуктів, а також [2]:

- для зменшення ваги і об'ємних обсягів;
- для економії витрат на транспортування і зберігання;
- для перетворення швидкопсувних продуктів в стабільні форми (наприклад, сухе молоко);
- для виробництва інгредієнтів і добавок для промислового перетворення (так звані проміжні харчові продукти), такі як овочі для супів, цибуля для вареного м'яса, фрукти для тістечок, сполучні речовини, ароматизатори, харчові барвники, гелеутворюючі та емульгуючі білки тощо);
- для отримання спеціальних напівфабрикатів (картопляні пластівці, розчинні напої, сухі сніданки, сухофрукти для використання в якості закусок) з характеристиками швидкого відновлення і хорошими сенсорними якостями.

Втрата вологості продукту при сушінні призводить до збільшення концентрації поживних речовин в масі, що залишилася, завдяки чому білки, жири і вуглеводи присутні в більшій кількості на одиницю ваги в сушеному кормі, ніж в свіжому.

Сьогодні класифікують системи сушіння на чотири класи [3]:

- сушарки для твердих речовин – конвективні сушарки, такі як сушарки для піддонів/шаф;
- сушарки для суспензій і пюре, такі як розпилювальні сушарки та барабанні сушарки;
- сублімаційні сушарки та системи осмотичного зневоднення;
- сушарки, що передбачають бар'єрний підхід або кілька методів сушіння за допомогою використання діелектричного нагрівання, вакууму тощо.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Анпілогов</i>						7	16
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							
						ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		

1. Сушарка для лотків/шаф. Сушарки для лотків використовуються для пакетного сушіння твердих продуктів у невеликих та помірних масштабах (від 2000 до 20 000 кг на день). Вони недорогі і прості в конструкції. Лоткові сушарки складаються із закритого відсіку в якому розміщені лотки з продуктами, що підлягають сушінню (рис. 1.1).

Сушарки з лотками використовуються для сушіння фруктів (виноград, фініки, яблука), овочів (цибуля, капуста) і трав (петрушка, базилік, м'ята, кріп). Температура повітря на вході, зазвичай, знаходиться в межах 60-80°C. Швидкість руху повітря становить кілька м/с і повинна бути скоригована відповідно до розміру, форми та щільності частинок продукту таким чином, щоб уникнути захоплення сухих частинок вітром. Залежно від продукту та умов, тривалість партії зазвичай становить від 2 до 10 годин. Більшість лоткових сушарок оснащені засобами для регульованої рециркуляції повітря. Швидкість рециркуляції збільшується в міру сушіння, коли повітря, що виходить з шафи, тепліше і менш вологе. Рециркуляція призводить до значної економії витрат на електроенергію.

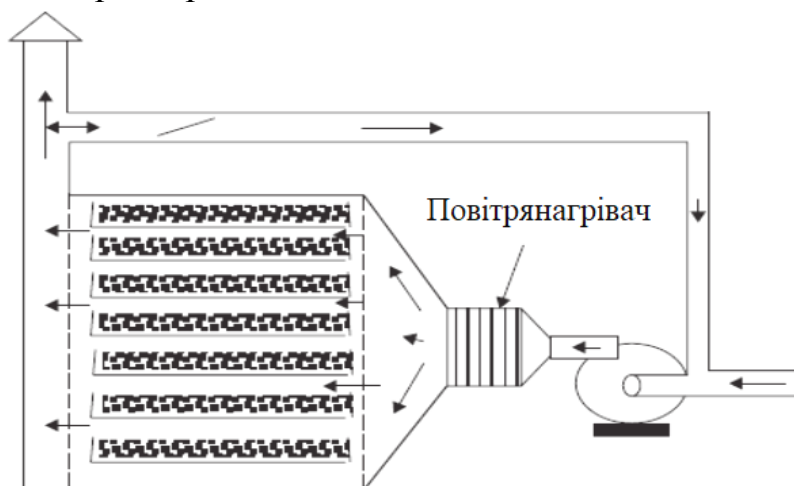


Рисунок 1.1 – Сушарка для піддонів/шаф

2. Тунельна сушарка. Тунельні сушарки складаються з довгих тунелів по яких рухаються вантажівки, що перевозять штабелі лотків з потоком сушильного повітря або проти нього (рис. 1.2).

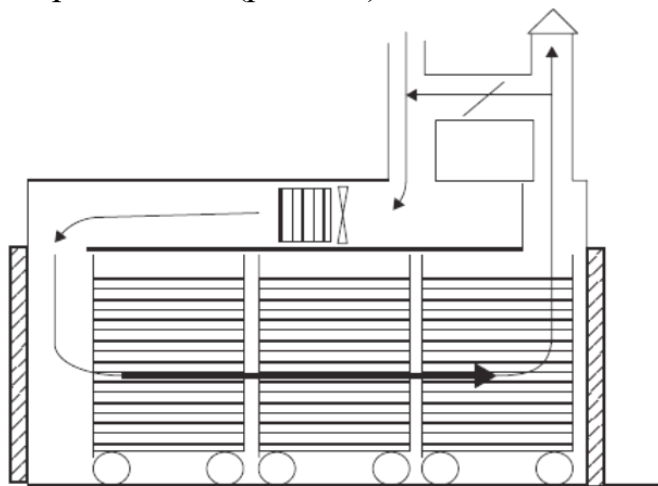


Рисунок 1.2 – Коротка тунельна сушарка

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Сировину, що підлягає сушінню, рівномірно розкладають на піддонах. Типове завантаження лотка для вологих овочів становить близько 10-30 кг на м². Коли одна вантажівка з вологим матеріалом вводиться в тунель з одного кінця, інша вантажівка, що перевозить зневоднений продукт, виїжджає на іншому кінці. Залежно від розміру і тунелю вантажівки переміщуються вручну або механічно, наприклад, за допомогою ланцюгів. Що стосується відносного напрямку руху повітря і вантажівок, тунельні сушарки працюють за принципом протитечії або змішаного струму (рис. 1.3).

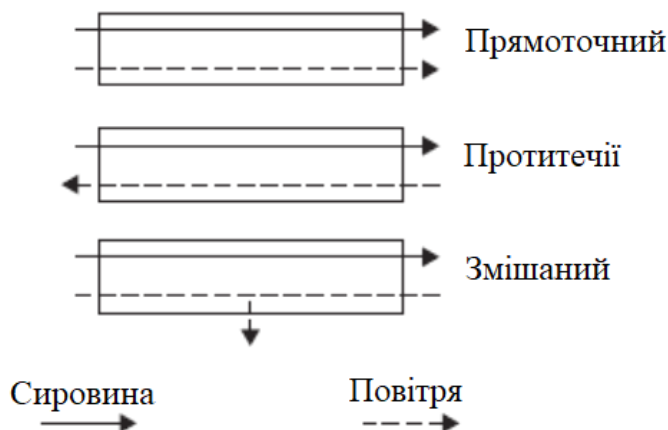


Рисунок 1.3 – Схеми потоку в тунельних сушарках

У першому випадку повітря з найвищою температурою та найнижчою вологістю зустрічається із сировиною, яка має найвищу вологість та найнижчу температуру, що забезпечує найвищу «рушійну силу» для сушіння і, отже, найшвидшу швидкість передачі води на вході в тунель. Якщо матеріал подачі досить вологий то його температура залишається низькою, незважаючи на контакт з гарячим повітрям. «Рушійна сила», однак, зменшується в міру того, як продукт рухається до виходу [1-3]. Повітря в кінці виходу з тунелю найбільш вологе і прохолодне. Отже, кінцева залишкова вологість продукту може бути не такою низькою, якою має бути. Протилежне відбувається у випадку з тунелями протитечії. Початкова норма сушіння нижча, але є можливість зневоднити продукт до нижчої кінцевої вологості.

Змішаний потік у тунельній сушарці функціонує як два тунелі послідовно. Перший – є співструмом і забезпечує бажану високу початкову швидкість сушіння. Остання його порція протитечії і дає потрібний фінішний ефект. На відміну від сушіння в шафі тунельна сушка забезпечує можливість впливу на продукт мінливого профілю зовнішніх умов. Крім температури і вологості повітря можна змінювати швидкість руху повітря.

В одній моделі, яка використовується для сушіння фруктів, тунель виконаний у вигляді двох послідовних блоків, з найменшим поперечним перерізом, що призводить до більш високої швидкості повітря в першому блоці (рис. 1.4).

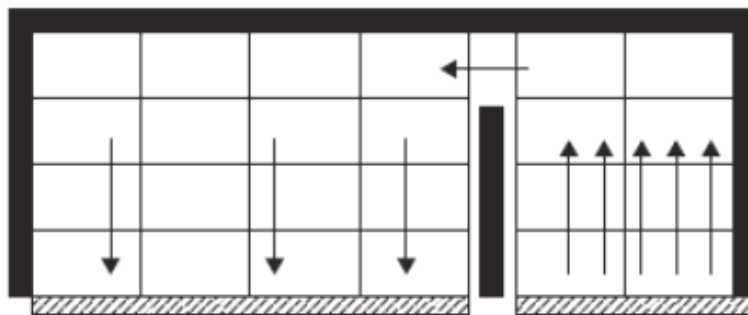


Рисунок 1.4 – Схеми потоку в тунельній сушарці

3. Роликові/барабанні сушарки. Основний принцип роботи поверхні, що нагрівається, полягає в огинанні обертового горизонтального металевого циліндра. Циліндр нагрівається за рахунок конденсації пари всередині, під тиском в діапазоні від 200 до 500 кПа з доведенням температури стінки циліндра до 120-155°C [1, 6]. Вологий матеріал наноситься на поверхню барабана відносно тонким шаром за допомогою різних методів, які будуть описані пізніше. Висушений продукт видаляється з барабана за допомогою леза (рис. 1.5).

Різні типи барабанних сушильних машин розрізняються за способом нанесення вологого матеріалу на поверхню барабана. Барабанні сушарки поділяються на два типи, а саме однобарабанні та двобарабанні сушарки. Двобарабанні сушарки складаються з двох барабанів, що обертаються в протилежних напрямках, з вузьким регульованим зазором між ними. Так звана «подвійна» барабанна сушарка складається, по суті, з двох незалежних одиночних барабанів, що спільно обертаються, які мають спільні додаткові пристрої.

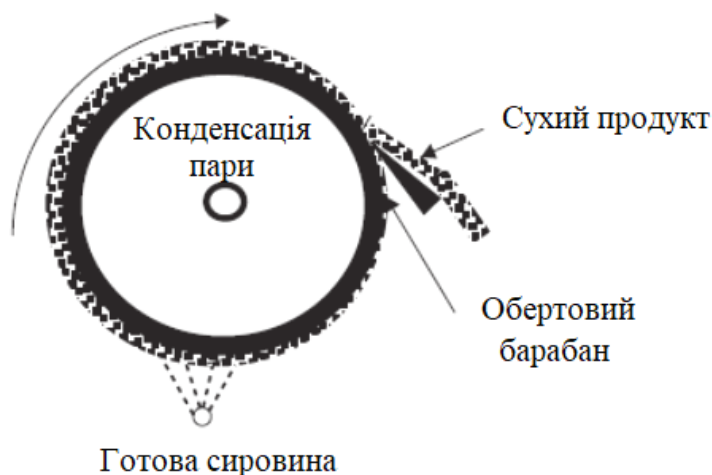


Рисунок 1.5 – Барабанна сушарка

Барабан частково занурений в рідину, що подається, який міститься в лотку. До зануреного сегменту барабана прилипає плівка рідини. Сировина безперервно подається в лоток. Оскільки маса матеріалу в лотку нагрівається барабаном, цей спосіб менш підходить для продуктів чутливих до нагрівання. У двобарабанній сушарці з щіпковою подачею живильна рідина вводиться в

						ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			10

басейн, що утворився між двома барабанами. Товщина прилиплої плівки контролюється за допомогою регулювання зазору. Цей тип обладнання використовується з менш в'язкими матеріалами, такими як молоко та інші молочні продукти. Валки-аплікатори використовуються для розподілу в'язких рідин, пюре і паст по поверхні барабана.

Однобарабанні сушарки з валками-аплікаторами широко використовуються при виробництві картопляного пюре швидкого приготування. Багаторазове застосування, що призводить до отримання більш товстих шарів, стає можливим завдяки встановленню ряду валків аплікатора на периферії барабана. Застосування валків також стане в нагоді для притискання плівки до барабана та для відновлення відповідного контакту і для зменшення пористості. Видалення водяних парів поблизу барабанів має важливе значення для запобігання адсорбції вологи сухим продуктом. З цією метою барабанні сушильні установки зазвичай оснащуються вентиляційними витяжками відповідного розміру.

4. Сушарка з киплячим шаром. У сушарках з киплячим шаром гаряче і сухе повітря використовується як для флюїдизації так і для сушіння. Сушіння в псевдозрідженому шарі можна застосовувати до твердих та не липких продуктів з розміром частинок в діапазоні від 0,05 до 10 мм залежно від щільності [6]. Сушка в псевдозрідженому шарі може бути порційною або безперервною (рис. 1.6). Завдяки ефективному тепло- і масообміну продукт швидко висушується. Прилипання і накопичення продукту в сушарках безперервної дії в значній мірі запобігається за рахунок вібрації рідинного шару.

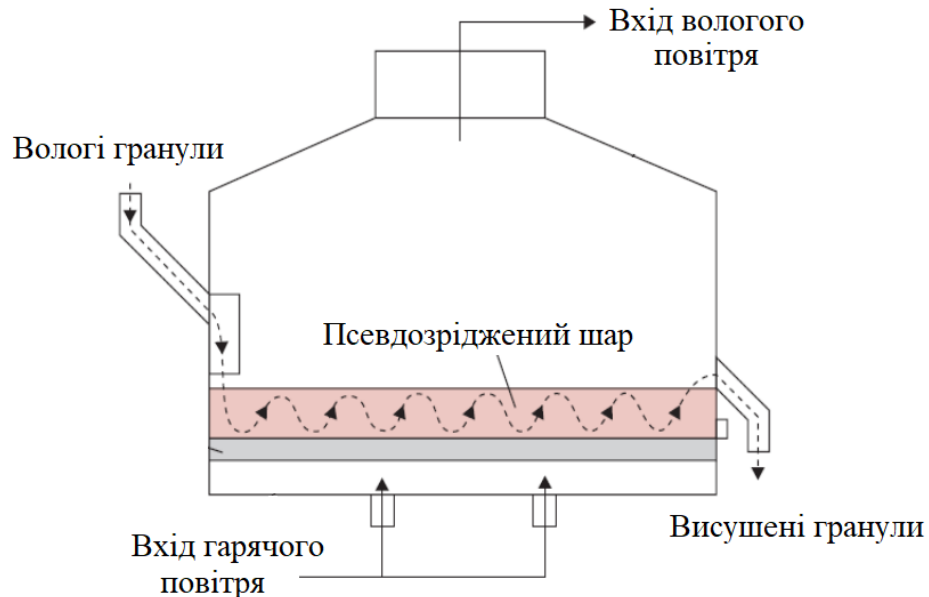


Рисунок 1.6 – Сушарка з киплячим шаром

5. Вакуумна сушарка. Вакуумна полицна сушарка складається з порожнистих полиць у вакуумній камері (рис. 1.7). Сировину укладають тонкими шарами на плоскі металеві підноси, які мають хороший контакт з полицями. У камері частково втягується вакуум і через полиці пропускається пара або гаряча вода для висушування продуктів. Швидке висихання та

обмежене теплове пошкодження продукту роблять обидва методи придатними для продуктів, які чутливі до тепла. Однак, необхідно стежити за тим, щоб висушений продукт не пригорів на підносі у вакуумних поличних сушарках, а усадка зменшує контакт між продуктом та нагрітими поверхнями в обох типах обладнання. Вони мають відносно високі капітальні та експлуатаційні витрати і низькі темпи виробництва.

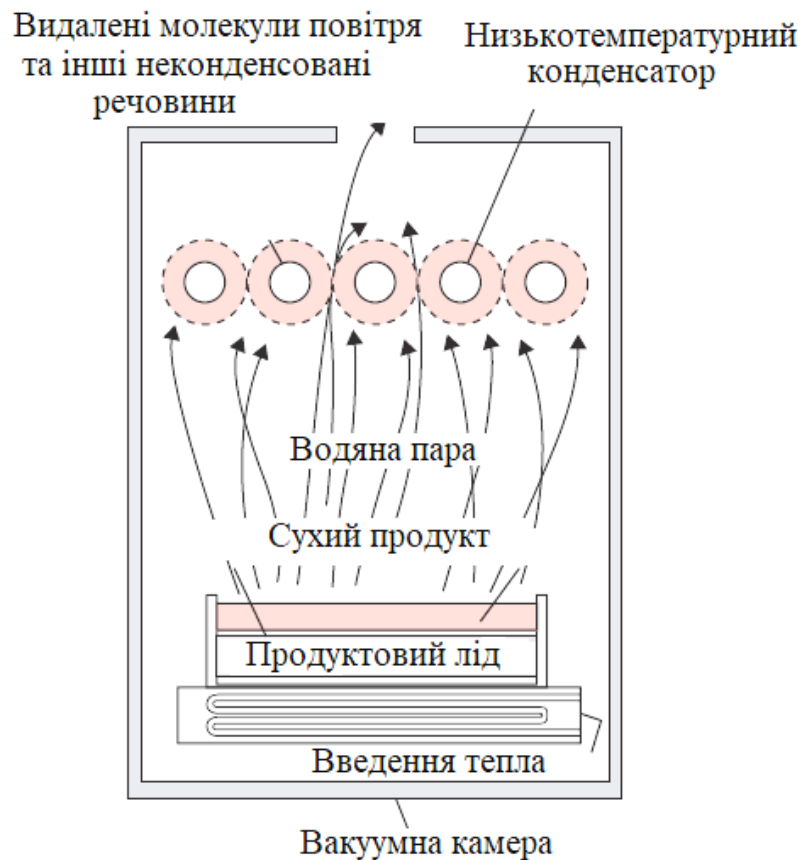


Рисунок 1.7 – Сублімаційна сушарка

6. Розпилювальна сушарка. Розпилювальні сушарки використовуються для сушіння рідких розчинів і суспензій з метою отримання легких, пористих порошків. Розпилювальна сушка є прийнятим методом для виробництва молока та сироваткових порошків, кавових вершків, сирного порошку, зневодненого дріжджового екстракту, розчинної кави та чаю, ізольованого соєвого білка, ферментів, яєчного порошку та багатьох інших продуктів у вигляді порошку.

Сушка розпиленням також є одним з методів, що використовуються для мікрокапсуляції. Рідина розпорошується (розпилюється) у вигляді розпилення дрібних крапель в дуже гаряче повітря всередині великої камери. Через свої невеликі розміри і високу температуру повітря краплі висушуються за лічені секунди і перетворюються в частинки твердого порошку. На виході з камери тверді частинки відокремлюються від вологого повітря. Система розпилювальної сушарки складається з наступних елементів [1-3]:

- повітрянагрівач;
- пристрій для формування розпилювача (розпилювач);
- насос для подачі рідини в розпилювач;

- сушильна камера;
- сепаратори твердих газів (циклони);
- вентилятори для переміщення повітря по системі.

7. Сублімаційна сушарка. Сублімаційне сушіння здійснюється шляхом зниження температури продукту таким чином, щоб більша частина вологи продукту перебувала в твердому стані, а за рахунок зменшення тиску навколо продукту можна досягти сублімації льоду (рис. 1.7). Коли якість продукції є важливим фактором для прийняття споживачами, сублімаційне сушіння забезпечує альтернативний підхід до видалення вологи. Процеси тепло- та масообміну при сублімаційному сушінні унікальні. Залежно від конфігурації системи сушіння теплообмін може відбуватися через шар замороженого продукту або через шар сухого продукту (рис. 1.7).

Очевидно, що передача тепла через замерзлий шар буде швидкою і не обмежує швидкість. Передача тепла через шар сухого продукту буде відбуватися з повільною швидкістю через низьку теплопровідність високопористої структури у вакуумі. І в тому, і в іншому випадку масообмін буде відбуватися в шарі сухого продукту. Очікується, що дифузія водяної пари буде процесом, що обмежує швидкість через низькі швидкості молекулярної дифузії у вакуумі. Перевагами процесу сублімаційного сушіння є висока якість продукції, що виникає в результаті низької температури під час сублімації і збереження структури продукту. Ці переваги врівноважуються з енергоємними аспектами заморожування продукту та вимог до вакууму.

Сублімаційне сушіння використовується для сушіння продуктів, які мають тонкий аромат або текстуру. Наприклад, каву, гриби, трави та спеції, полуницю та малину, фруктові соки, м'ясо, морепродукти або овочі. Сублімаційна сушка також використовується для виробництва повноцінних страв для туристів, військових пайків або космічних польотів. Нові продукти включають ліофілізовані краплі вершків, йогурту та крем-фрешу для використання в сухих сніданках, кондитерських виробках та як начинку для десертів. Сублімаційне сушіння також використовується для приготування активних ферментів (наприклад, для сироваріння) і мікробних культур для тривалого зберігання.

На онові вищезазначеного можна вважати, що актуальним є:

- вибір відповідного сушильного обладнання в залежності від сировини;
- ефективність та продуктивність існуючого сушильного обладнання;
- вплив режимів сушіння на кінцевий продукт;
- ефективність механізму сушіння.

1.2 Сушіння сировини із використанням теплового насосу

Сушіння є однією з основних операцій в харчовій промисловості, що пов'язана з величезними витратами. Часткове або повне видалення води із сировини є складним процесом, що вимагає великої кількості енергії. Впровадження екологічно чистих технологій сушіння відбувається повільно через низьку факторов. Використання теплових насосів сприяє економічній та

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

екологічній вигоді, про що свідчить багато досліджень щодо їх використання у процесі сушіння.

Тепловий насос – це пристрій, який транспортує енергію від джерела з низькою температурою до поглинача з вищою температурою. Ця передача вимагає введення роботи, яка може подаватися механічно, як в циклі паростиснення, або у вигляді тепла в циклі поглинання [2, 5, 6]. Найбільш поширений тип теплових насосів працює за циклом паростиснення, а основний вузол складається з випарника, компресора, конденсатора і розширювального клапана. На рисунку 1.8 показано, що сушильне повітря осушується у випарнику і знову нагрівається до потрібної температури в конденсаторі перед його подальшим проходженням через сировину, тим самим пропонуючи перевагу кращої швидкості сушіння та якості продукту порівняно зі звичайною сушкою.

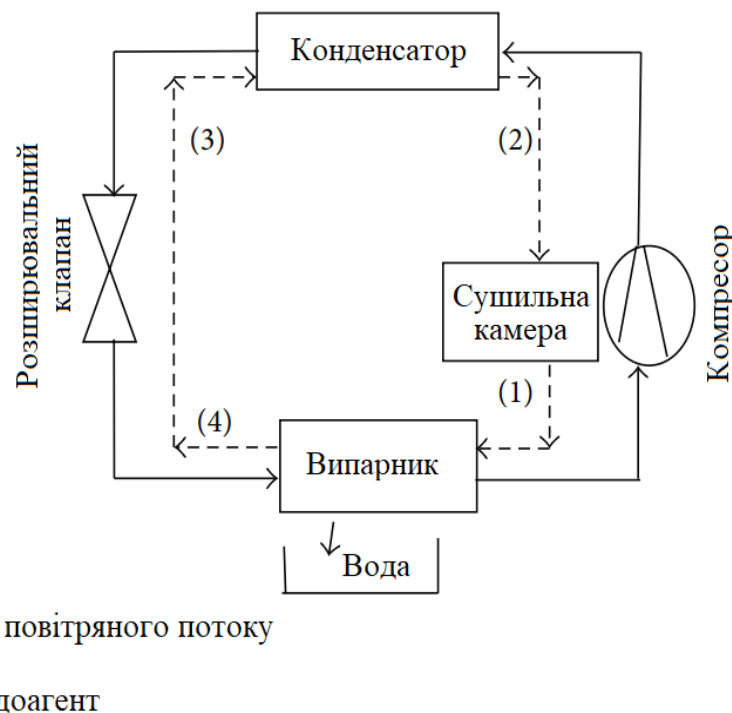


Рисунок 1.8 – Компонентне розташування сушильної машини з тепловим насосом

Теплові насоси в поєднанні з повітряно-конвективними осушувачами мають потенціал для економії частини використовуваної первинної енергії. Їх принцип осушення заснований на збереженні енергії, при цьому, інтегровані системи енергетично закриті від навколишнього середовища. Тепле (при температурі зазвичай від 30⁰С до 57⁰С) і сухе повітря (при низькій відносній вологості) проводиться по поверхні продукту, що підлягає сушінню [24, 25]. Процес під час якого водяна пара (вологість) видаляється із повітря при збереженні постійної сухої температури термометра називається осушенням. У реальній практиці процес осушення в чистому вигляді неможливий, оскільки осушення завжди супроводжується охолодженням або нагріванням повітря. Коли повітря вступає в контакт з охолоджуючим змішувиком, який

підтримується при більш низькій температурі, ніж точка роси, його температура починає знижуватися. Процес охолодження триває і при певній точці досягає температури точки роси в повітрі. При цій температурі водяна пара починає перетворюватися в частинки роси, за рахунок чого на поверхні охолодження утворюється роса і вологість повітря знижується, тим самим знижуючи рівень його вологості. Відповідно, відбувається охолодження та осушення повітря, коли повітря охолоджується нижче температури точки роси.

Пара, що видаляється з поверхні висушеного продукту, конденсується в холодному змішувачу теплового насоса (випарнику) і остаточно нагрівається в гарячій спіралі теплового насоса (конденсаторі). Таким чином, відновлене відпрацьоване тепло (відчутне та приховане) одночасно повертається назад у сушарку при вищій температурі для повторного використання у процесі сушіння. Цей метод, як правило, більш сприятливий для сушіння твердих продуктів і може зменшити до 50% або більше споживання первинної енергії промисловими процесами сушіння [2, 5, 6]. Сушильні системи з тепловим насосом практично енергетично замкнуті і тому на відміну від звичайних сушильних пристроїв вони викидають невелику кількість теплового вологого повітря в навколишнє середовище. До основних переваг сушильних систем з тепловим насосом можна віднести можливість:

- контроль відносної вологості повітря у процесі, а також температури сухого і вологого термометра;
- висока енергоефективність за рахунок підйомів низьких температур;
- ефективний контроль вологості продукту, що призводить до кращої якості кінцевого продукту;
- зменшення глобального споживання енергії.

Існує багато можливих способів застосування сушіння тепловим насосом. Однією з переваг теплового насоса в порівнянні з іншими джерелами тепла для сушіння є те, що його можна застосовувати до будь-яких видів сушильних машин. Будь-яка сушарка, яка використовує конвекцію як основний спосіб надходження тепла, може бути оснащена відповідним чином сконструйованим тепловим насосом. Проте сушарки, які потребують великої кількості сушильного повітря, наприклад, флеш-сушарки або розпилувальні сушарки не підходять для роботи з тепловим насосом [2, 4]. Технологія сушіння з тепловим насосом була об'єднана з іншими методами сушіння для подолання деяких проблем, що виникли в цих методах і для досягнення поліпшення якості продукції, зниження енергоспоживання, високого коефіцієнта продуктивності та високої теплової ефективності.

Система сушіння з тепловим насосом націлена на покращення продуктивності сушарок. Це можна робити як при більш низьких (від -20°C до 45°C) так і при більш високих (від 45°C до $+110^{\circ}\text{C}$) температурах. Сонячні, мікрохвильові, інфрачервоні та радіочастотні системи сушіння вимагають більш високих температур, в той час як хімічні, вакуумні та охолоджувальні системи із осушувачем повітря з тепловим насосом працюють при відносно низьких температурах. Основними перевагами технології є потенціал енергозбереження та можливість контролювати температуру сушіння та вологість повітря. Сушарки з тепловим насосом в основному перекачують

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тепло з осушеного повітря в інший повітряний потік в іншому місці, використовуючи холодоагент для перенесення тепла.

Класифікація систем осушення з тепловим насосом в залежності від застосовуваної температури наведена на рисунку 1.9. Сушіння за допомогою теплового насоса може бути поєднане з сушінням в мікрохвильовій печі, інфрачервоним сушінням, сушінням в псевдозрідженому шарі, сублімаційним сушінням, радіочастотним сушінням та сушінням за допомогою хімічного теплового насоса [2, 5]. Особливо це актуальне для чутливої до тепла сировини, а саме фрукти та овочі, яким потрібна лише низька температура. Тепловий насос може видавати більше енергії у вигляді тепла, ніж електричної енергії, яку він споживає. Крім того, може використовувати модифіковану атмосферу для сушіння чутливих матеріалів. Кількість ступенів роботи теплового насоса в сушарці та інші механізми можуть бути варіювані для підвищення продуктивності сушарки.

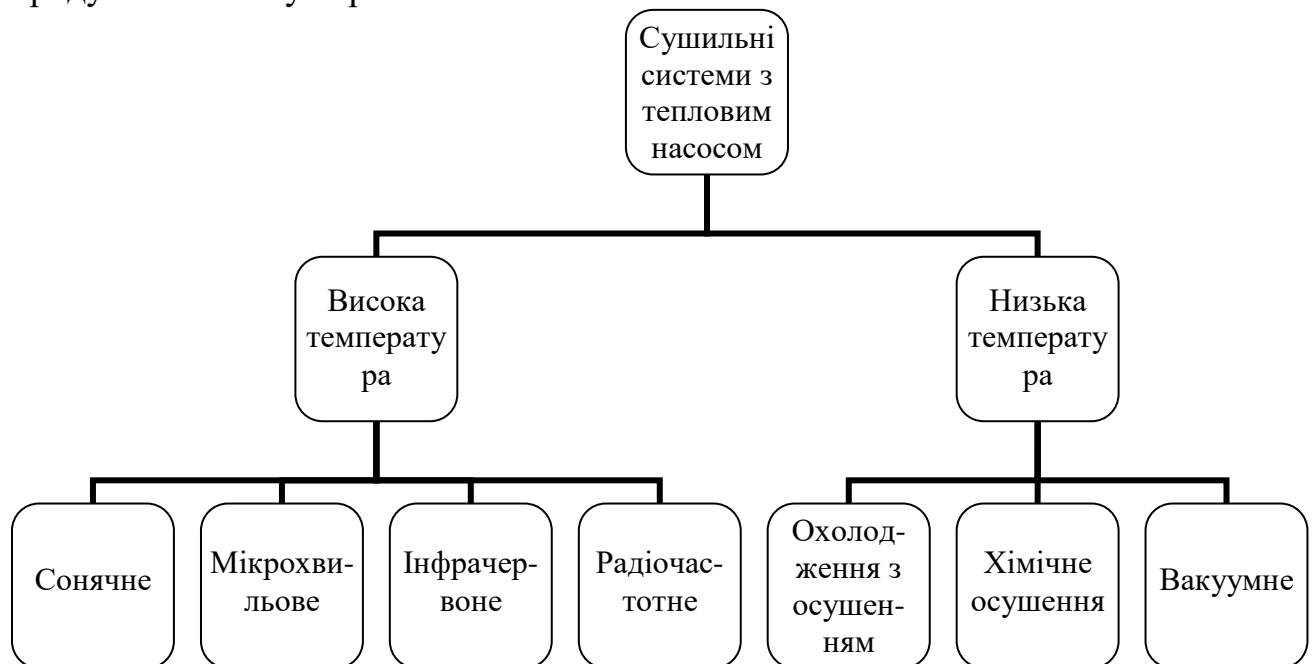


Рисунок 1.9 – Класифікація систем осушення з тепловим насосом в залежності від застосовуваної температури

Під час сушіння сировини гарячим повітрям повітря нагрівається до температури сушіння (за допомогою електричних нагрівачів або теплообмінників, що споживають паливо) для підвищення швидкості передачі тепла в сушильній камері. Це збільшує внутрішній тиск пари та швидкість дифузії вологи в сировині до поверхні, звідки вона дифундує в технологічне повітря. У звичайній ситуації абсолютна вологість технологічного повітря залежить від умов навколишнього середовища. Використання осушувача повітря з тепловим насосом у цьому контурі дозволяє контролювати вміст вологи та температуру повітря, а також відновлювати приховану теплоту випаровування води з вихлопного потоку, яка в іншому випадку втрачається у вигляді відпрацьованого тепла. Схему сушильної установки з тепловим насосом наведено на рисунку 1.10.

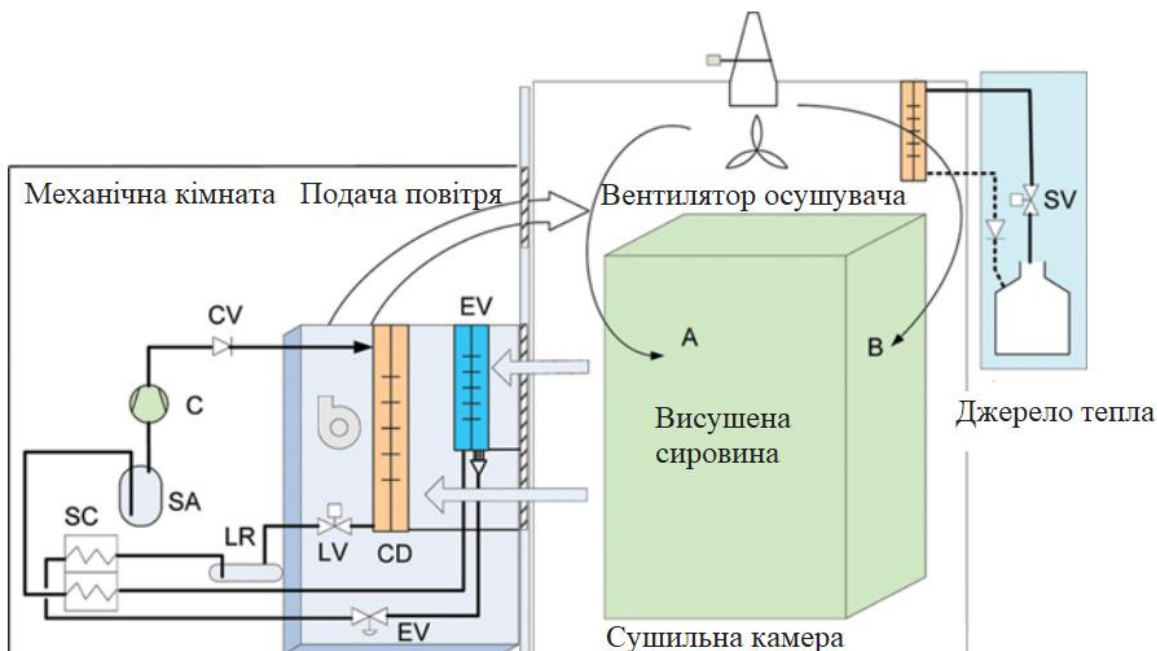


Рисунок 1.10 – Схема сушильної установки з тепловим насосом

На рисунку 1.10 представлено: А і В – потік обертання вентилятора; С – компресор; CD – конденсатор; CV– зворотний клапан; EX – розширювальний клапан; LR – приймач рідини; SA – всмоктуючий акумулятор [4]

Випарник і конденсатор встановлюються в одній шафі за межами сушильної камери, а тепле і вологе повітря, що надходить з сушильної камери, розділяється на два потоки. Перший охолоджується до певної температури, а потім осушується через випарник, тоді як другий обходить випарник і потім змішується з осушеним повітрям, що проходить через випарник. Таке розташування дає можливість ефективно управляти швидкістю осушення теплового насоса, а також температурою і відносною вологістю гарячого і сухого повітря, що подається в сушильну камеру.

Сушарка з тепловим насосом забезпечує низьку відносну вологість і низьку температуру, тому вони можуть скоротити час сушіння. Оптимальна температура сушіння для рослинної сировини, включаючи фрукти та овочі, знаходиться в діапазоні від 30 до 45°C де не відбувається структурних пошкоджень і втрат поживних речовин [1-3]. Широкий діапазон режимів сушіння, зазвичай, від -20 до 50°C допустимий при сушінні. Низькі температури, що застосовуються, а також можливість використання інертної атмосфери можуть призвести до отримання продуктів кращої якості в аспектах аромату, текстури, смаку та зовнішнього вигляду. Отже, термочутливі фітохімічні речовини та поживні речовини можна зберегти, застосовуючи цю техніку сушіння. Технологія ґрунтується на більш низьких температурах, тому додатковий нагрів не потрібен, що стосується критичного рівня тиску деяких холодоагентів.

При охолодженні та сушінні рослинної сировини розподіл і швидкість потоку повітря є критичними факторами. Коли повітря рухається над змішувачем випарника його температура знижується і одночасно видаляється і

волога, оскільки повітря охолоджується нижче температури точки роси. Роса, що утворилася на змійовику охолодження, відкачується невеликими трубками. Змійовик охолодження охолоджується холодоагентом або охолодженою водою в центральних системах кондиціонування повітря [1-4]. Тим часом атмосферне повітря проходить над цим змійовиком він охолоджується і осушується. В основному процес охолодження та осушення відбувається шляхом пропускання повітря через змійовик, через який пропускається холодоагент (охолоджений газ). Протягом усього процесу температура сухого термометра, вологого термометра і точки роси повітря знижується. Крім того, відчутна теплота і прихована теплота повітря зменшуються, викликаючи повсюдне зменшення ентальпії повітря.

На рисунку 1.11 показаний приклад осушення при постійній температурі зі зменшенням коефіцієнта вологості. Процес охолодження і осушення повітря, що призвело до зниження співвідношення температури і вологості як сухого, так і вологого термометра (рис. 1.11 б).

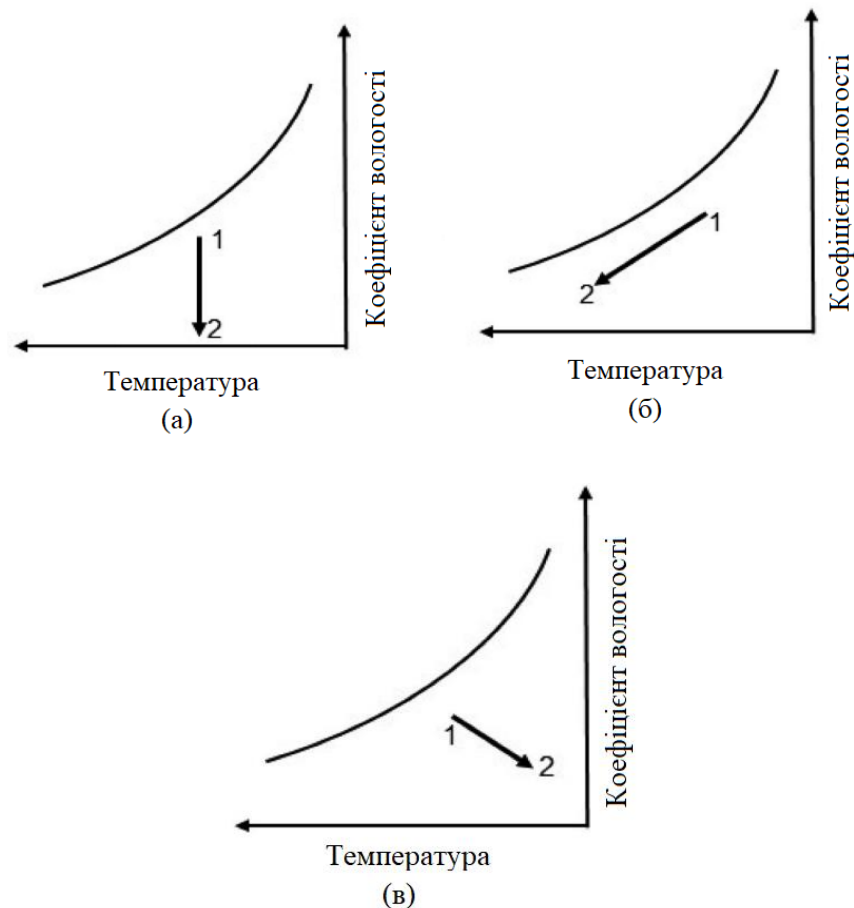


Рисунок 1.11 – Процес осушення при низькій температурі:
 (а) осушення при постійній сухій температурі термометра;
 (б) охолодження з процесом осушення повітря;
 (в) хімічний процес осушення повітря.

Цей графік показує, що як відчутне, так і приховане тепло зникає в міру того, як умова зміщується вліво на графіку. В такій ситуації з повітря видаляється і волога, і тепло. На рисунку 1.11 в показаний процес хімічного

осушення при якому водяна пара поглинається або адсорбується з повітря за допомогою абсорбуючого матеріалу. Системи охолодження спочатку охолоджують повітря до точки роси (100% відносної вологості). Після цього моменту подальше охолодження видаляє вологу. Чим більше повітря охолоджується тим глибше повітря буде висушене.

Відповідно, харчові продукти з більш високим вмістом вологи можна ефективно сушити за допомогою сушіння з тепловим насосом. Оскільки сухе повітря поглинає більше цієї доступної енергії, прихована енергія може бути передана у випарниках для більш високої рекуперації тепла. Наприклад, сушіння рису при низькій температурі може заощадити енергію та підвищити якість кінцевих продуктів порівняно з іншими обраними традиційними методами [1-6]. Дослідження показали, що сушіння із осушенням за допомогою теплового насоса, яке отримане для імбиру з використанням двох ступенів сушіння, може скоротити час сушіння при 40⁰С на 59,32%. Результати дослідження сушіння листя м'яти при низькій температурі (30–37⁰С) показали, що цей метод зберіг вміст аскорбінової кислоти у висушеному продукті. Сушіння тепловим насосом при температурі 50⁰С забезпечує кращу якість висушеного листя м'яти порівняно з сушінням гарячим повітрям та сушінням у мікрохвильовій печі. Аналіз досліджень показав, що технологія застосовується для сушіння такої сировини:

- червоного перцю, зеленого солодкого перцю, імбиру, листя солодкого базилика;
- бананів, нектаринів та тріски;
- сухих яблук, ананасів, грибів, лаврового листа та оливкового листа;
- сухого рису, насіння капусти та скумбрії.

Сушіння тепловим насосом є ефективним, екологічно чистим методом отримання високоякісних продуктів харчування. Сушильні машини з тепловим насосом є економічно ефективними в багатьох сферах сушіння, оскільки вони можуть витягувати та використовувати приховану енергію повітря та водяної пари для сушіння продуктів. Сушіння тепловим насосом споживає лише близько половини або третини електроенергії звичайних конденсаторних осушувачів.

1.3 Порівняння ефективності сушильних машин

Сушіння є складною операцією, яка включає передачу маси та тепла разом із фізичними та структурними варіаціями. Основною метою сушіння харчових продуктів є консервування на яке впливає метод сушіння. Серед традиційних методів сушіння низькотемпературний метод має вищий діапазон температур. Очевидно, що як низькотемпературні методи так і сублімаційне сушіння, які охоплюють нижчі температурні діапазони, в кінцевому підсумку призводять до отримання продуктів вищої якості в аспектах збереження поживної цінності, кольору, аромату, смаку тощо.

Сушіння з тепловим насосом має здатність рекуперувати приховане і відчутне тепло шляхом конденсації вологи з сушильного повітря, чого не можуть зробити інші методи сушіння. Відновлене тепло повертається назад у

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сушарку за рахунок нагрівання осушеного сушильного повітря, отже, енергоефективність значно підвищується в результаті рекуперації тепла, яке в іншому випадку втрачається в атмосфері в звичайних сушарках [12-16]. Це дозволяє сушити при нижчих температурах, нижчих витратах і експлуатації навіть у вологих умовах навколишнього середовища. В таблиці 1.1 наведено загальне порівняння низькотемпературних осушувачів з тепловим насосом та іншими поширеними традиційними сушарками.

Таблиця 1.1 – Загальне порівняння низькотемпературних осушувачів з тепловим насосом та іншими поширеними сушарками

Параметри	Низькотемпературний з ТН	Сушка гарячим повітрям	Вакуумна сушка	Сублімаційна сушка
Робоча температура, °С	від – 20 до 40	від 40 до дуже високої	від 30 до 60	-35 до 50
Робоча відносна вологість, %	10-50	змінна	низька	низька
Ефективність сушки, %	до 95	35-40	до 70	дуже низька
Швидкість висихання	швидка	середня	дуже повільна	дуже повільна
Якість сировини	гарна	середня	гарна	гарна
Регідратаційні властивості	гарна	середня	помірна	гарні
Експлуатаційні витрати	низькі	високі	дуже високі	дуже високі
Контроль	на високому рівні	помірний	на високому рівні	на високому рівні

Низька енергоефективність і більш тривалий час сушіння є основними недоліками конвективних сушарок, що пов'язано з поганою теплопровідністю до внутрішніх ділянок сировини. Незважаючи на те, що конвективна сушка має помірну початкову вартість, експлуатаційні витрати порівняно нижчі, ніж інші традиційні методи сушіння [5, 6, 10]. Сушарки з тепловим насосом економічно ефективні в багатьох сферах сушіння, оскільки вони можуть використовувати приховану енергію повітря та водяної пари для сушіння сировини. Встановлено, що конвективне сушіння споживає лише близько половини або третини електроенергії звичайних конденсаторних осушувачів. Однак, сушильні машини з тепловим насосом мають найнижчі експлуатаційні витрати в порівнянні з конвективними осушувачами з електричним нагріванням.

Висока температура сушіння зазвичай призводить до погіршення якості харчових продуктів, особливо сушіння гарячим повітрям. Як правило, харчові продукти втрачають аромат і поживний вміст під впливом більш високої температури протягом тривалого періоду для отримання певного висушеного

продукту. Сушильну машину з тепловим насосом можна розглядати як альтернативний метод сушіння продуктів з меншим споживанням енергії, меншою відносною вологістю та нижчою температурою. Тому охолодження за допомогою осушувальних осушувачів забезпечує численні переваги перед звичайними осушувачами з гарячим повітрям для сушіння харчових продуктів, охоплюючи вищу енергоефективність, кращу якість продукції та здатність працювати незалежно від зовнішніх погодних умов навколишнього середовища. Найбільшою перевагою у сушінні харчових продуктів є його здатність використовувати низькопотенційне тепло в насиченому вологою (вологому) повітрі для ефективної роботи [18-22]. Тепле і вологе повітря є бар'єром в операціях конвективного сушіння гарячим повітрям. Тим не менш, тепле і вологе повітря є необмеженим джерелом тепла для осушування з тепловим насосом і створює ідеальне середовище для сушіння. Завдяки нагріванню осушеного повітря рекупероване тепло повертається назад у сушарку. Завдяки підвищенню енергоефективності та меншому споживанню викопного палива дану технологію сушіння можна розглядати як актуальним методом.

Основними перевагами є енергозберігаючий потенціал і можливість контролювати температуру сушіння, швидкість потоку і вологість повітря, що призводить до більш якісної харчової продукції. Крім того, ця технологія є екологічно чистою, оскільки гази та пари не виділяються в атмосферу, а конденсат може бути відновлений і ліквідований. Для харчових матеріалів з високим вмістом вологи ефективним методом зневоднення є сушіння за допомогою теплового насоса при низькій температурі, а саме краща якість, стабільна продукція може бути досягнута завдяки контрольованій температурі (до 50°C) і відносній вологості (10-90%), що використовуються в охолодженні за допомогою технології осушення.

За останні десятиліття технологія розширилася і зараз доступні теплові насоси з газовим двигуном і з електричним приводом. Газові двигуни є природним вибором для систем охолодження та опалення, оскільки вони покращують загальну ефективність використання енергії та знижують експлуатаційні витрати, ніж електродвигуни. Спостерігається кращий профіль кольору та аромату, кращі властивості регідратації, нижча активність води та менший ступінь пошкодження клітинної структури висушених сільськогосподарських продуктів за допомогою теплового насоса, ніж у звичайних сушарках з гарячим повітрям.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння є ключовим процесом в харчовій промисловості. Велика кількість сировини сушиться для збільшення терміну придатності, зниження вартості упаковки, зниження ваги при доставці, покращення зовнішнього вигляду, збереження оригінального смаку та харчової цінності. Основна мета сушіння полягає в тому, щоб видалити вологу з продукту, щоб бактерії, дріжджі та пліснява не могли рости та псувати продукт. У багатьох випадках процес сушіння застосовується до такої сировини як фрукти та овочі, щоб вони могли зберігатися якомога довше та бути доступними поза сезоном.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазначено, що сушіння є однією з основних операцій в харчовій промисловості, що пов'язана з величезними витратами. Часткове або повне видалення води із сировини є складним процесом, що вимагає великої кількості енергії. Впровадження екологічно чистих технологій сушіння відбувається повільно через низку факторів. Використання теплових насосів сприяє економічній та екологічній вигоді, про що свідчить багато досліджень щодо їх використання у процесі сушіння. Теплові насоси в поєднанні з повітряно-конвективними осушувачами мають потенціал для економії частини використовуваної первинної енергії. Принцип осушення заснований на збереженні енергії, при цьому інтегровані системи енергетично закриті від навколишнього середовища. Тепле (при температурі зазвичай від 30⁰С до 57⁰С) і сухе повітря (при низькій відносній вологості) проводиться по поверхні продукту, що підлягає сушінню.

Пара, що видалається з поверхні висушеного продукту, конденсується в холодному змійовику теплового насоса (випарнику) і остаточно нагрівається в гарячій спіралі теплового насоса (конденсаторі). Таким чином, відновлене відпрацьоване тепло (відчутне та приховане) одночасно повертається назад у сушарку при вищій температурі для повторного використання у процесі сушіння. Цей метод, як правило, більш сприятливий для сушіння твердих продуктів, може зменшити до 50% або більше споживання первинної енергії промисловими процесами сушіння. Сушильні системи з тепловим насосом практично енергетично замкнуті, тому на відміну від звичайних сушильних пристроїв, вони викидають невелику кількість теплового вологого повітря в навколишнє середовище.

Вважається перспективним застосування технологій сушіння з низькотемпературним тепловим насосом у харчовій промисловості завдяки добре контрольованим умовам сушіння (вологість, швидкість потоку та температура). Сушіння із застосуванням теплового насоса має найбільш помітний вплив, оскільки сприяє відновленню значної кількості енергії. Сушіння з тепловим насосом пропонує харчові продукти з кращою якістю завдяки контрольованій атмосфері зі зниженим споживанням енергії. Крім того, високоцінні термочутливі харчові продукти можуть бути зневоднені за допомогою цього методу сушіння зі збереженням поживних речовин, покращуючи регідратацію (менше пошкодження клітинної структури) та органолептичні (запах, аромат, смак, текстура та зовнішній вигляд) властивості та подальше забезпечення привабливості для споживачів.

Здійснено порівняння низькотемпературних осушувачів з тепловим насосом з іншими традиційними сушарками. Результати аналізу показали, що сушіння з тепловим насосом є альтернативним методом сушіння харчових продуктів, що призводить до кращої якості з низькою вартістю, безпечнішою експлуатацією та вищою енергоефективністю. Сушіння тепловим насосом споживає лише близько половини або третини електроенергії звичайних конденсаторних осушувачів.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ІЗ СИСТЕМОЮ ОСУШЕННЯ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

2.1 Стратегія зменшення енергоспоживання та підвищення продуктивності обладнання для сушіння

Для харчової промисловості сушіння є одним з найбільш енерговитратних процесів, бо споживає майже до 50% енергії. Сушіння – складний, енергоємний і дуже нелінійний процес тепло- і масообміну. Він відбувається шляхом подачі тепла на вологу сировину з метою випаровування рідини, що міститься всередині [4] Більшість промислових сушарок – це повітряні конвективні осушувачі, які використовують викопне паливо або електроенергію як основні джерела енергії. Більшість тепловтрат відбувається через вологе відпрацьоване повітря і погану теплоізоляцію сушильних камер. У зв'язку з втратами енергії, останнім часом, увага зосереджується на зменшенні або відновленні відпрацьованого тепла в рамках скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів.

Як зазначалося раніше, у процесі сушіння потрібне тепло для випаровування вологи із продукту і потік повітря для відведення вологи, що випаровується, що робить сушіння високоенерговитратною операцією [2]. Для сушіння доступні різні джерела тепла, однак, у зв'язку зі зростанням цін на електроенергію та викидами CO₂ при традиційних методах сушіння енергозбереження та інші методи рекуперації тепла для переробки та сушіння продукції набувають дуже важливого значення.

Застосування теплового насоса успішно використовується для сушіння рослинної сировини. Сушіння за допомогою теплового насоса має менший час сушіння, ніж інші методи сушіння і воно просте в конструкції апаратів. Для розвитку сталої енергетики необхідні три важливі технологічні зміни: енергетична економія, підвищення ефективності виробництва, енергія та відновлення використання викопного палива за рахунок різних джерел відновлюваної енергії [2, 7, 8]. У зв'язку з цим, системи із використанням теплового насоса підвищують енергоефективність і спричиняють меншу витрату викопного палива. Оскільки сушіння за допомогою теплового насоса є низькотемпературним процесом сушіння, він уможливорює подвійну перевагу перед звичайними, поширеними методами сушіння.

Для виведення води з харчових продуктів потрібна велика кількість енергії. Оскільки процеси сушіння є енергоємні, знання про їх ефективність та оптимальні умови експлуатації є необхідними для економічної роботи сушарок. Сушіння використовує одну або комбінацію конвекції, провідності або

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Антілогов				Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу	Літ.	Арк.	Аркушіє
Перевір.	Омельченко						23	10
Н. Контр.	Омельченко				ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО			
Затверд.	Хорольський							

випромінювання для проведення тепла до продукту, який підлягає сушінню. Було вжито численних заходів для підвищення ефективності сушіння конвекційним сушінням, зокрема, шляхом застосування охолодження з осушенням. Осушувачі з низькотемпературним тепловим насосом знаходять все більше застосування в харчовій промисловості для сушіння зерна, фруктів, овочів, трав, риби, м'яса та інших харчових продуктів у різних країнах.

Загалом енергозберігаючі методи для здійснення процесу сушіння сировини поділяються на дві основні категорії: зменшення навантаження на випаровування (наприклад, зменшення початкового вмісту вологи, уникнення надмірного сушіння); підвищення ефективності сушіння (наприклад, оптимізація робочих параметрів, зменшення втрат тепла, підвищення ефективності рекуперації тепла). Для того, щоб оптимізувати робочі параметри та уникнути пересушування кінцевого продукту, необхідно контролювати та аналізувати процес сушіння і аналізувати тепломаообмінні процеси, що відбуваються під час сушіння сировини в сушарці.

Процес сушіння можна розділити на три основні етапи сушіння. На першому етапі вологість сировини змінюється дуже повільно, тоді як відносна вологість відпрацьованого повітря швидко підвищується. Температура сировини нижча за температуру повітря для сушіння. Достатня температура є обов'язковою умовою для випаровування води в умовах нормального атмосферного тиску. На цьому етапі енергія в основному використовується для нагрівання сировини шляхом провідності та конвекції замість випаровування води, а вологість залишається майже постійною. На цьому етапі міграція вологи в основному залежить від механічних процесів, а не від конвекції, і таким чином, мігрована волога є вільною вологою, що прикріплюється механічним шляхом на поверхню сировини. Щоб скоротити час сушіння, необхідно прагнути до того, щоб відпрацьоване повітря досягало максимальної вологості з найбільшою швидкістю.

На другому етапі вміст вологи в сировині починає швидко знижуватися. Відповідна відносна вологість відпрацьованого повітря становить близько 95%. Під час другого етапу відносна вологість відпрацьованого повітря залишається близькою до рівня насичення. Вологість сировини залишається високою, а поверхня повністю покривається вологою. На цьому етапі мігрована волога в основному є вільною вологою, яка є на поверхні продукту. Температура практично дорівнює температурі вологого термометра сушильного повітря. Отже, на цій стадії енергія, що забезпечується потужністю нагрівача в основному використовується для випаровування води, а вологість швидко зменшується за рахунок капілярного потоку вільної вологи всередині сировини. У міру висихання міграція вологи всередині сировини не може компенсувати випаровування вільної води на поверхні [20-25]. Вільна волога всередині продукту поступово знижується до критичного вмісту вологи. Згодом швидкість сушіння зменшується і це свідчить про початок третього етапу.

На цьому етапі вміст вологи в сировині, в основному, є вільною вологою. Температура сировини підвищується в бік температури вологого термометра повітря, а вологість відпрацьованого повітря швидко знижується. Згідно з термодинамікою, підвищення температури поверхні сировини не сприяє

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

випаровуванню води через те, що тиск пари на поверхні більший, ніж тиск усередині тканини. Велика частина енергії, що виділяється нагрівачем, йде на підвищення температури сировини замість випаровування води. Отже, на цьому етапі для зменшення споживання енергії можна використовувати нижчу потужність нагрівача. Відповідно, на швидкість видалення вологи одночасно впливають кілька факторів, таких як початкова вологість сировини, потужність нагрівача, швидкість повітряного потоку конвективного середовища тощо. Тому вищезазначені фактори слід враховувати в процесі оптимізації.

Як відомо, продуктивність сушарки або сушильної системи характеризується різними показниками, включаючи енергоефективність, теплову ефективність, об'ємну швидкість випаровування, питомі витрати тепла, поверхневі тепловтрати і питома витрата пари, які визначаються з урахуванням особливостей різних технологій сушіння. Розрахунки ефективності, які корисні при оцінці продуктивності сушарки, пошуку вдосконалень, а також при порівнянні різних класів сушарок, які можуть бути альтернативними для конкретної сушильної операції [12, 13, 14, 23]. Енергоефективність призначена для забезпечення об'єктивного порівняння різних сушильних машин і процесів сушіння. Виділяють три групи факторів, що впливають на ефективність сушіння. До них відносяться чинники:

- пов'язані з навколишнім середовищем, зокрема, станом навколишнього повітря;
- характерні для сировини;
- конкретно ті, що стосуються конструкції та експлуатації сушарки.

Фактори, які пов'язані з навколишнім середовищем, добре враховуються при застосуванні теплового насоса, що робить його більш високоефективним, ніж інші методи сушіння. Ефективність сушіння на повітрі η може бути визначена за формулою [2]:

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_a)}$$

де T_1 – температура повітря на вході в сушарку;

T_2 – температура повітря на виході з сушарки;

T_a – температура навколишнього повітря.

Температура повітря на вході в сушарку є основним фактором, що визначає ефективність сушіння. Щоб максимізувати ефективність, запропоновано, щоб температура на вході в сушарку була максимальною відповідно до вимог до продукту. Енергоефективність – це відношення прихованої теплоти випаровування вологи, що видаляється, до тепловіддачі сушильного повітря. Для систем з тепловим насосом ефективність сушіння – міра кількості енергії, використаної для видалення однієї одиниці маси води з продукту, яка зазвичай виражається в кДж кг/вода або кВт·год кг/вода.

Питомий коефіцієнт відведення вологи (ПКВВ), який виражається в кг/кВт год. Альтернативним показником енергоефективності сушильних машин

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з тепловим насосом є питомий коефіцієнт відведення вологи, який визначається за допомогою

ПКВВ=Кількість випарованої води/використана енергія

Питомий коефіцієнт відведення вологи може бути розрахований або як миттєве значення, або як середнє значення при сушінні. У процесі сушіння значення ПКВВ зменшується, оскільки видалення вологи ускладнюється через менший дефіцит водяної пари на поверхні сировини. Для сушильних машин з тепловим насосом значення ПКВВ може бути вищим за теоретичне максимальне значення [2, 14]. Енергоефективність технології із застосуванням теплового насосу може відобразитися у високих значеннях ПКВВ та ефективності сушіння порівняно з іншими системами сушіння. Отже, високий ПКВВ тоді перетвориться на низькі експлуатаційні витрати, що зробить термін окупності початкового капіталу значно коротшим. Холодильна потужність не повинна бути надмірною, щоб не знизити відносну вологість і, як наслідок, зменшити питомий коефіцієнт відведення вологи.

Коефіцієнт корисної дії (ККД). На ефективність роботи вказує коефіцієнт продуктивності охолодження компресора. ККД можна використовувати для оцінки обсягу роботи, перетвореного в тепло для двох різних операцій системи: охолодження та нагрівання. Для теплового насоса бажана передача тепла \dot{Q} від системи до гарячого тіла, а коефіцієнт корисної дії виражається [2]:

$$ККД = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{W}_{cycle}}$$

де \dot{W} цикл – електрична потужність на вході компресора.

По можливості слід вибрати температури випаровування і конденсації з метою оптимізації і подальшої теплової ефективності.

Швидкість висихання (ШВ). При сушінні на повітрі швидкість видалення води залежить від умов повітря, властивостей продуктів і конструкції сушарки. Швидкість сушіння виражається в наступному:

$$ШВ = \frac{m_t - m_{t+\Delta t}}{\Delta t}$$

де m_t – маса в момент часу t .

Швидкість висихання буде зменшуватися в міру зниження вологості. Фактори, що впливають на швидкість сушіння дещо відрізнятимуться, залежно від типу використовуваної системи сушіння. Щоб досягти максимальної потужності сушіння потік повітря повинен бути протитечійним, а не перехресним потоком або котечією руху продукту, щоб максимізувати відносну вологість на виході з сушарки [2, 23]. Запропонували враховувати наступні фактори:

– характер сировини: фізико-хімічний склад, вологість тощо;

						ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			26

- розмір, форма та розташування сировини, що підлягають сушінню;
- відносну вологість або парціальний тиск водяної пари в повітрі (всі вони пов'язані і вказують на кількість вологи, яка вже є в повітрі);
- температуру повітря;
- швидкість повітря.

В цілому швидкість сушіння зменшується зі вмістом вологи, збільшується з підвищенням температури повітря або зменшується з підвищенням вологості повітря. При дуже малих повітряних потоках збільшення швидкості викликає більш швидке сушіння, але при великих швидкостях ефект мінімальний, що вказує на те, що дифузія вологи всередині зерна є керуючим механізмом.

Питома витрата енергії. Питома витрата енергії залежить від ефективності сушарки, продукту та початкової вологості. Волога біля поверхні виробів потребує більше енергії для її видалення, ніж волога в центрі виробу. Це пов'язано з тим, що волога стікає від центру до поверхні. Питома витрата енергії оцінюється з урахуванням часу сушіння та використання енергії різними компонентами сушарки. Вона виражається в показниках МДж/кг води, що видаляється і використовується як один з факторів оптимізації параметрів процесу. Її можна розрахувати шляхом інтегрування використаної енергії та шляхом обчислення кількості видаленої вологи [2]:

$$Q_s = \frac{Q_h}{\Delta G}$$

де Q_s – питома витрата енергії на сушіння;

Q_h – енерговитрати осушуючого повітря;

ΔG – маса води, що випарувалася.

Сушильні машини з тепловим насосом є перспективними технологіями, які підтримують якість продукції та знижують енергоспоживання сушіння, особливо для таких як фрукти та овочі. Застосування сушіння за допомогою теплового насоса позитивно впливає на рослину сировину, як покращена безпека мікроорганізмів, кращий колір, збереження вітаміну С, покращена летка сполука, ароматичні та смакові сполуки, регідратація та текстура. Відповідно, впровадження технології сушіння з тепловим насосом для сушіння фруктів та овочів покращить якість продукції та зменшить споживання енергії в процесі.

Енерговитрати у процесі сушіння залежать від ефективного узгодження потужності насоса зі швидкістю сушіння сировини. Але в той же час швидкість сушіння залежить від умов надходження повітря в сушильну камеру. У поточній ситуації швидкість компресора фіксована, а масова швидкість холодоагенту є змінною.

Сушіння зберігає продукт за рахунок видалення деякої кількості води в сировині, в той час як заморожування знижує його температуру нижче точки замерзання води. Розрізняють три способи усунення вологи з повітря: шляхом його охолодження для конденсації водяної пари, шляхом збільшення загального тиску, що призводить до конденсації та пропускання повітря через

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

осушувач, який витягує вологу з повітря через різницю тисків пари [1]. Операція під час якої повітря «розумно» охолоджується з одночасним зниженням вмісту в ньому вологи називається процесом охолодження та осушення.

Як тільки повітря охолоджується нижче температури точки роси, волога конденсується на найближчій поверхні. Відповідно, повітря осушується за рахунок процесів охолодження і конденсації. Кількість виведеної вологи залежить від того, наскільки холодним повітря може бути охолодженим, а при нижчій температурі він висушує більше повітря. Відразу після того, як повітря при даній сухій температурі термометра охолоджується нижче температури його точки роси, завершується процес охолодження і осушення [18]. Холодильна система охолоджує повітря і відводить частину його вологи у вигляді конденсату і відправляє повітря в охолоджувач, висушує повітря назад в космос. Система в основному перекачує тепло з осушеного повітря в інший повітряний потік в іншому місці, використовуючи теплоносій (холодоагент) для перенесення тепла. Розглянемо процес сушіння за допомогою теплового насоса (рис. 2.1).

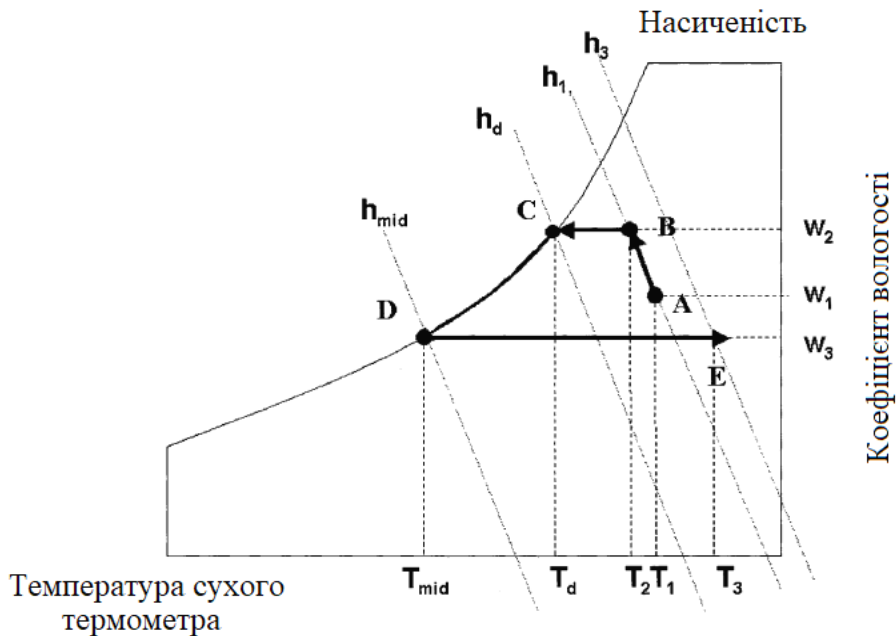


Рисунок 2.1 – Процес сушіння за допомогою теплового насоса

Процес в сушильній камері має адиабатичний характер насичення і протікає по постійній мокрій лінії термометра (AB). Швидкість сушіння за цей період забезпечить кількість вологи, що додається в повітря в сушильній камері. У випарнику повітря охолоджується і температура переміщається від B до C. Кількість тепла, що передається випарнику на цьому етапі, і є відчутною теплотою. Після закінчення осушення повітря знаходиться в точці D.

2.2 Удосконалення обладнання для сушіння рослинної сировини

Витрати енергії в перерахунку на тепло становлять значну частку від загальної вартості сушіння, особливо у випадку з найпопулярнішими

						ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
							28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

конвективними сушарками. Незважаючи на те, що майже 100% теплової енергії передається в осушувальне повітря в прямих осушувачах, на відміну приблизно 70% в непрямих осушувачах, додаткові втрати тепла в навколишнє середовище і відведення з відпрацьованими газами знижують загальну теплову ефективність до 60% або менше [11]. Таким чином, енергетична ефективність конвективних сушарок має велике значення, оскільки на їх частку припадає близько 85% всіх промислових сушарок. Різні заходи, такі як часткова переробка відпрацьованих газів або рекуперація тепла на додаток до використання багатоступеневих сушарок, можуть підвищити загальну енергоефективність сушарки. Проте витрати енергії на тепло становлять значний відсоток від загальних витрат на сушіння, особливо при використанні неефективних методів, таких як непрямий нагрів сушильного повітря. Наприклад, концентрація рідкої сировини шляхом випаровування (наприклад, молока) та осмотична дегідратація фруктів та ягід перед термічною сушкою розглядаються як варіанти зниження потреби в енергії в харчовій промисловості.

Нові, більш ефективні сушарки та гібридні системи, такі як сушильні машини з тепловим насосом можуть зменшити витрати на енергії. Сушіння з тепловим насосом – це технологія за допомогою якої сировину можна сушити при низькій температурі та в безкисневій атмосфері, використовуючи менше енергії, ніж звичайні методи сушіння. Тому, технологія є перспективною для сушіння рослинної сировини, яка є термічно чутливою до кисню.

Конвективні сушарки характеризуються низькою енергоефективністю, що пов'язано з великими втратами тепла з вихідним сушильним агентом. Одним з перспективних шляхів підвищення теплової ефективності конвективних сушарок є використання такого енергозберігаючого обладнання, як теплові насоси [10, 16]. При сушінні тепловим насосом волога, яка видаляється, не накладається сушильним агентом в навколишнє середовище і конденсується на холодній поверхні випарника і подається в рідкому вигляді. Теплота конденсації водяної пари тепловим насосом перетворюється на більш високий рівень температури і повертається в процес сушіння, що забезпечує значне зниження питомої витрати енергії в порівнянні з традиційними сушарками і сприяє зменшенню теплового «забруднення» навколишнього середовища. На рисунку 2.2 зображено удосконалену схему конвективного сушіння із додатковою системою осушення тепловим насосом.

Транспортування тепла досягається за рахунок фазової зміни робочого тіла (холодоагенту). Холодоагент у випарнику поглинає тепло і випаровується при низькому тиску і температурі. Оскільки пара конденсується при більш високому тиску в конденсаторі, вона віддає тепло при більш високій температурі. При використанні в системі сушіння тепловий насос охолоджує технологічне повітря спочатку до насичення, а потім далі для конденсації води (осушення), тим самим збільшуючи потенціал сушіння повітря. При цьому він також відновлює низькопотенційну теплоту (відчутну і приховану) з повітря, яка стає доступною в конденсаторі у вигляді відчутного тепла більш високої якості.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

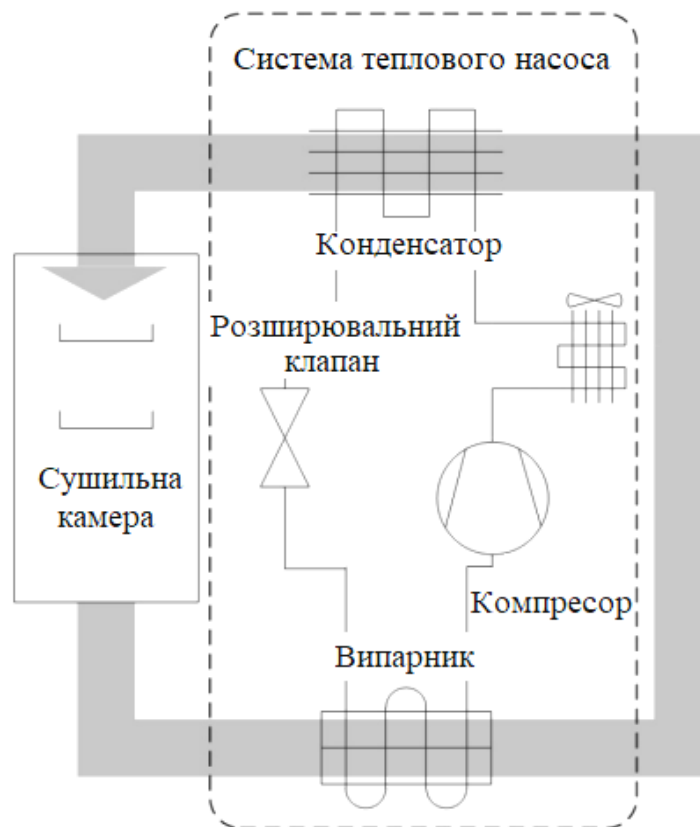
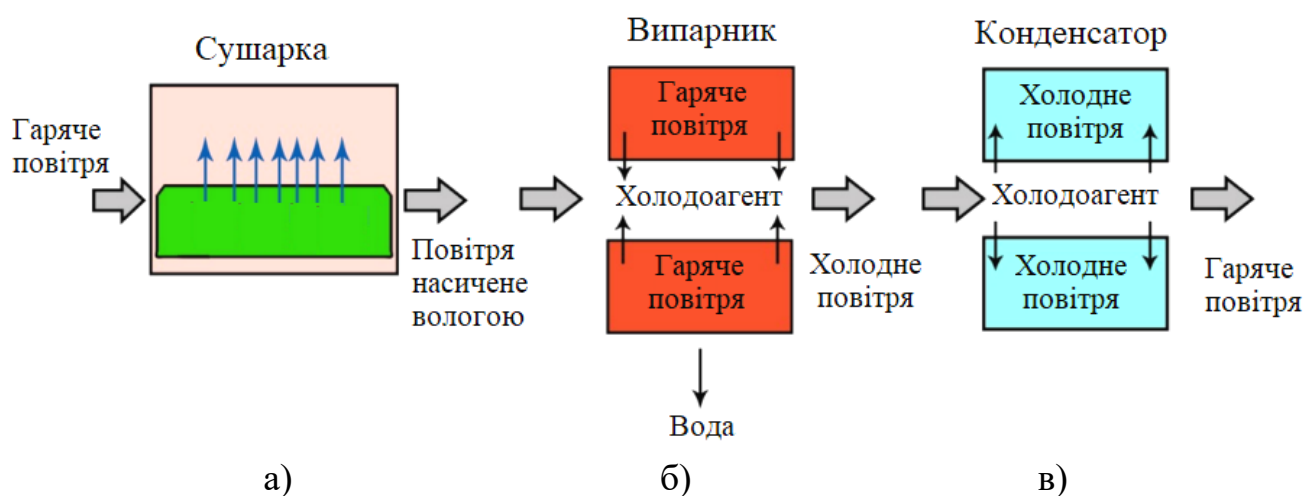


Рисунок 2.2 – Принципова схема сушіння за допомогою теплового насоса для конвективного сушіння

Система може працювати і як осушувач, і як нагрівач для технологічного повітря. Завдяки випарнику вологий потік підлягає вихлопу, в той час як свіже повітря забирається через конденсатор. При цьому типі розміщення прихована теплота (разом з кількістю відчутної теплоти) відновлюється за рахунок осушення вихлопних газів і передається, а процес повітря здійснюється через конденсатор. Така конфігурація краща коли навколишнє повітря сухе, але не дуже економічна на завершальних етапах сушіння, оскільки потік вихлопу майже нагадує вхідне повітря. В обох конфігураціях вихлопні гази з сушильної камери можуть повертатися у випарник. Технологічне повітря може бути повністю або частково перероблене.

Як зазначалося раніше, осушувач повітря – це низькотемпературний тепловий насос «повітря-повітря», який функціонує аналогічно побутовому холодильнику. Він складається з конденсатора (гарячого теплообмінника), компресора і випарника (холодного теплообмінника). В основному в тепловому насосі є дві системи: шлях холодоагенту та повітряний шлях. У внутрішньому контурі він представляє шлях холодоагенту, а зовнішній контур представляє шлях повітря [1-6]. Холодоагент у випарнику зазнає фазових змін з рідини в пару за рахунок поглинання тепла повітря. Потім холодоагент, який випарувався, надходить в насос, де тиск підвищується і далі передається в конденсатор. У конденсаторі холодоагент змінює свою фазу з пари на рідину, виділяючи приховане тепло. Потім ліквідований холодоагент надходить до розширювального клапана і безпосередньо надходить у випарник.

Холодоагент переходить у пароподібний стан з рідкого стану у випарнику, поглинаючи тепло насиченого вологою повітря, яке надходить від компонента сушарки. Отже, повітря охолоджується і осушується у випарнику. У цьому процесі повітря спочатку відчутно охолоджується до температури точки роси, а подальше охолодження в точці роси виробляє воду шляхом конденсації повітря на поверхні випарника. Коли насичене вологою повітря проходить через випарник, він стає осушеним холодним повітрям. Відносна вологість цього осушеного повітря досягає 100%, тоді як температура конденсатної води приймається як температура виснаженого холодного повітря на виході з випарника [1, 12]. Потім повітря, що залишилося, надходить в конденсатор, де холодоагент конденсується і відводить тепло. Це тепло поглинається холодним повітрям і воно стає сухим повітрям перед тим, як піти в сушарку. Основні компоненти, що використовуються в процесі охолодження з осушенням наведені на рисунку 2.3.



Рисунку 2.3 – Процес охолодження з осушенням [10]

На рисунку 2.3 позначено: а) осушувач, б) випарник, в) конденсатор.

Обладнання, яке виконує осушення охолодженням, надзвичайно різноманітне. Як правило, у всьому світі використовується велика кількість різних комбінацій компресорів, випарників і конденсаторів. Однак, існують три основні конфігурації обладнання, що представляють інтерес для проектування систем контролю вологості, які включають охолодження з прямим розширенням, охолодження охолодженою рідиною та осушення з повторним нагріванням [1, 17]. Тепло відводиться з осушеного повітря шляхом спочатку передачі його теплової енергії холодоагенту, який знаходиться всередині охолоджувального змійовика, який охолодив повітря. Змійовик називається випарником, тому, що холодоагент випаровується всередині змійовика і розширюється з рідини в газ (рис. 2.3 б). Це розширення відбувається всередині змійовика за рахунок поглинання тепла повітрям, що проходить через змійовик. Зі змійовика охолодження газоподібний холодоагент направляється в компресор, де його тиск значно підвищується приблизно в 5-10 разів більше,

ніж коли він виходив зі змійовика випарника. Тому газ має набагато менший об'єм, але стиснення підняло його температуру.

Конденсатор розташований за межами кондиціонованого простору, в місці, де тепло може відводитися повітрю, не викликаючи проблем. Стиснений, гарячий холодоагент конденсується назад до рідини всередині змійовика, тоді як тепло передається повітрю з іншого боку змійовика конденсатора (рис. 2.3 в). Потім охолоджена рідина холодоагенту повертається в змійовик, охолоджуючи найбільш ранній повітряний потік. Коли рідина знову розширюється назад до газу всередині змійовика випарника, цикл повторюється, поглинаючи більше тепла. Процес може бути дуже ефективним. Звичайним показником ефективності є коефіцієнт продуктивності, який є енергією, що видаляється з осушеного повітряного потоку, поділеного на енергію. Ця передавальна енергія складається з енергії компресора плюс енергії вентилятора, який проштовхує повітря через дві котушки.

На основі вище зазначеного можна вважати, що для харчової промисловості сушіння є одним з найбільш енерговитратних процесів, бо споживає майже до 50% енергії. Сушіння – складний, енергоємний і дуже нелінійний процес тепло- і масообміну. Він відбувається шляхом подачі тепла на вологу сировину з метою випаровування рідини, що міститься всередині. Більшість промислових сушарок – це повітряні конвективні осушувачі, які використовують паливо або електроенергію, як основні джерела енергії. Більшість тепловтрат відбувається через вологе відпрацьоване повітря і погану теплоізоляцію сушильних камер. У зв'язку з втратами енергії, останнім часом, увага зосереджується на зменшенні або відновленні відпрацьованого тепла в рамках скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів.

Зазначено, що конвективні сушарки характеризуються низькою енергоефективністю, що пов'язано з великими втратами тепла з вихідним сушильним агентом. Одним з перспективних шляхів підвищення теплової ефективності конвективних сушарок є використання такого енергозберігаючого обладнання, як теплові насоси. При сушінні тепловим насосом волога, яка видаляється, не накладається сушильним агентом в навколишнє середовище і конденсується на холодній поверхні випарника і подається в рідкому вигляді. Сприймаема випарником теплота конденсації водяної пари тепловим насосом перетворюється на більш високий рівень температури і повертається в процес сушіння, що забезпечує значне зниження питомої витрати енергії в порівнянні з традиційними сушарками і сприяє зменшенню теплового «забруднення» навколишнього середовища.

Застосування теплового насоса успішно використовується для сушіння рослинної сировини. Сушіння за допомогою теплового насоса має менший час сушіння, ніж інші методи сушіння і воно просте в конструкції апаратів. Для розвитку сталої енергетики необхідні три важливі технологічні зміни: енергетична економія, підвищення ефективності виробництва, енергія та відновлення використання викопного палива за рахунок різних джерел відновлюваної енергії. Запропоновано удосконалену схему конвективного сушіння із додатковою системою осушення тепловим насосом.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Якісна характеристика сушеної рослинної сировини

Поняття «якість» досить складне в харчовій промисловості. Проте, як правило, якість асоціюється з органолептичними показниками продукту, які роблять його прийнятним для споживачів. На сьогодні регідратація є найбільш вивченим параметром якості за яким слідують погіршення кольору та усадка. Науковці групують властивості, які пов'язані з якістю сировини [2-6]:

- структурні властивості (щільність, пористість, конкретний об'єм);
- оптичні властивості (колір, зовнішній вигляд);
- властивості текстури;
- термічні властивості (стан продукту: склоподібний, кристалічний);
- сенсорні властивості (аромат, смак, колір);
- харчові характеристики (вітаміни, білки);
- регідратаційні властивості (швидкість та здатність до регідратації).

На якісні характеристики впливає безліч факторів, проте найбільший вплив на якість кінцевого продукту мають температура сушіння і швидкість видалення вологи. Додаткове тепло і час витримки продукту при підвищених температурах при звичайному сушінні гарячим повітрям впливає на якість поживних речовин харчових продуктів. Основними хімічними змінами з якими стикаються під час сушіння є потемніння, окислення ліпідів і втрата кольору. Вважається, що на регідратацію, розчинність, втрату текстури та аромату впливають умови сушіння. Поживні речовини, вітаміни, білки і мікробне навантаження залежать від температури сушіння і часу. Збереження цих пігментів при зневодненні важливо в основному для того, щоб зробити продукт привабливим і прийнятним для споживачів. Зміни текстури та фізичної структури висушеного матеріалу впливають на таку поведінку, як відновлення та регідратація, а також на органолептичні особливості, такі як смакові.

Фрукти та овочі піддають певній попередній обробці з метою поліпшення або збереження їх характеристик під час сушіння. Занурення в лужні розчини, сульфитація і бланшування є одними із загальних попередніх процедур. Обробка діоксидом сірки зазвичай використовується для збереження кольору висушеного матеріалу. Діоксид сірки та сульфіти діють як інгібітори дії ферментів і запобігають ферментативному потемнінню. Занурення цілих плодів в лужний етилолеат прискорює процес сушіння без будь-яких небажаних впливів на якість продукту. Стабільність при зберіганні – найважливіша характеристика сушених продуктів. Він контролюється сукупністю факторів, таких як упаковка, умови зберігання, ступінь зневоднення.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Аннілогов</i>				Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового наосу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						33	7
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

1. Якість. Особливості технології сушіння тепловим насосом, які допомагають контролювати якісні характеристики, включають можливість роботи при абсолютній вологості менше, ніж у навколишньому середовищі, можливість вибору температури сушіння менше або вище температури навколишнього середовища, а також можливість сушіння в невентильованій камері за допомогою модифікованої сушильної атмосфери. Якість висушених продуктів, що підвищується при сушінні за допомогою теплового насоса, може складатися з ряду фізичних, хімічних і сенсорних характеристик.

2. Мікробна безпека. Погіршення якості, викликане мікроорганізмами, є небажаним з комерційної точки зору, оскільки вони обмежують термін зберігання або призводять до погіршення якості. Сушіння допомагає зменшити або подолати потенційні пошкодження мікроорганізмів [2, 6]. При сушінні за допомогою теплового насоса мікробна безпека зводиться до мінімуму за рахунок забезпечення відповідності всієї сировини визнаним стандартам приготування.

Сушильні машини з тепловим насосом здатні підвищити мікробну безпеку харчових продуктів, підтримуючи дані про відносну вологість на прийнятному низькому рівні. Робоча температура сушильних машин з тепловим насосом не обмежена вологістю навколишнього середовища. Сушильна машина з тепловим насосом не підтримує велику популяцію мікроорганізмів на катушках або будь-якому іншому місці по всій сушарці. Однак, щоб запобігти накопиченню мікробної активності, стерилізацію необхідно проводити вчасно.

3. Колір. Погіршення кольору є основною причиною втрат при сушінні продуктів. Колір продуктів має важливе значення для їх прийнятності. В сушильних машинах з тепловим насосом вологість можна регулювати незалежно від навколишнього середовища. Крім того, було виявлено, що сушіння фруктів під азотом ефективно пригнічує побуріння під час початкового критичного періоду сушіння, коли вміст вологи високий. Така умова можлива завдяки використанню модифікованої сушки з атмосферним тепловим насосом, завдяки чому виробляють фрукти та овочі високої якості.

4. Вміст аскорбінової кислоти, летких сполук та утримання активних інгредієнтів. Добре зафіксовано вплив сушіння при постійній температурі на якість продукції. Проте використання знижених температур повітря на початку сушіння, як у випадку сушіння з тепловим насосом, з подальшим підвищенням температури в міру сушіння, дає продукт кращої якості. Концентрація летких сполук зазвичай збільшується при сушінні, особливо при більш низьких температурах, характерних для сушіння тепловим насосом. Сушильна машина з тепловим насосом є найкращою системою для збереження летких сполук.

5. Втрата аромату та смаку. Методи сушіння, в яких використовується низька температура, забезпечують високу концентрацію ключових ароматичних сполук [2]. Наприклад, імбир, висушений у сушарці з тепловим насосом, зберігає понад 26% гінгеролу, основного леткого смакового компонента, відповідального за його гостроту, порівняно з комерційними зразками ротаційного сушіння, які містять лише близько 20%. Більш висока леткість в імбирі, висушеному за допомогою теплового насоса, може бути

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

пов'язана зі зниженням деградації гінгеролу, коли використовуються низькі температури сушіння замість високих конвенційних температур сушарки. Наприклад, колір і аромат трав (петрушка, розмарин і солодкий фенхель) можуть бути поліпшені за допомогою даної технології. Сенсорні цінності висушених трав тепловим насосом майже вдвічі вищі.

6. Регідратація. Під час сушіння можуть спостерігатися важливі зміни структурних властивостей фруктів і овочів, оскільки із вологого матеріалу видаляється вода. Регідратація – це процес зволоження сухих харчових матеріалів [2, 6, 8]. У більшості випадків сушені продукти замочують у воді перед приготуванням або вживанням, тому регідратація є дуже важливим критерієм. Фактори, що впливають на процес регідратації, включають пористість, капілярність і порожнину біля поверхні продукту, температуру, захоплені бульбашки повітря, аморфно-кристалічний стан, розчинні тверді речовини, аніон, рН води для замочування та рівень сухості. Більш швидка регідратація була пов'язана зі скибочками яблук, висушеними за допомогою сушарки з модифікованим атмосферним тепловим насосом.

7. Усадка. Усадка відбувається спочатку на поверхні і поступово переходить на дно сушильних предметів зі збільшенням часу сушіння. Також клітинна стінка стає витягнутою і у внутрішній структурі утворюються тріщини, так як сушіння протікає при високій температурі. Нагрівання призводить до серйозних змін у структурі продуктів. Усадка відбувається через те, що полімерні харчові продукти не можуть витримати їх вагу і, отже, руйнуються під дією гравітаційної сили за відсутності вологи. Сушіння з тепловим насосом, однак, передбачає сушіння при низькій температурі, що робить усадку менш вираженою.

3.2 Модель процесу сушіння із використанням теплового насосу

Велику кількість плодово-овочевої сировини сушать для збільшення терміну зберігання, збереження цінних сполук, зниження витрат на упаковку, зниження ваги доставки, поліпшення зовнішнього вигляду, збереження смаку та харчової цінності. Звичайна техніка сушіння гарячим повітрям є найбільш широко використовуваним методом виробництва сухофруктів. Однак, технологія пов'язана з високими витратами на електроенергію, високою температурою сушарки та тривалим часом сушіння.

Сушіння з тепловим насосом – це технологія за допомогою якої сировину можна сушити при низькій температурі та в безкисневій атмосфері, використовуючи менше енергії, ніж при звичайних методах сушіння. Тому технологія є перспективною для сушіння рослинної сировини, яка є термічно чутливою до кисню. Технологія все частіше використовується в харчовій промисловості завдяки низькому споживанню енергії, меншим втратам якості, високій тепловій ефективності та високій продуктивності сушіння.

Як відомо, енергозбереження сушіння засноване на принципі зворотного циклу Карно (холодильний цикл), він може рекуперувати енергію з вихлопу та самостійно контролювати температуру та вологість повітря. Крім того, завдяки великій кількості тепла, яке доступне з різних природних джерел і

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

відпрацьованого тепла, що виробляється в різних переробних галузях, технологія стає незамінною та може сприяти більш чистому середовищу.

Сушарки та теплові насоси є складними термодинамічними системами. Отже, системи, що об'єднують осушувачі та теплові насоси, набагато складніші, ніж кожен з цих компонентів окремо. Тому їх не слід аналізувати самостійно через складну взаємодію між процесом сушіння повітря і термодинамічним циклом теплового насоса (холодоагенту). Будь-яка система сушіння за допомогою теплового насоса повинна бути фізично ізольована від навколишнього середовища, щоб повною мірою використовувати переваги технології, такі як економія енергії та краща кінцева якість висушених продуктів [15]. Сучасні промислові сушильні процеси являють собою або систему з розімкнутим контуром з використанням нагрітого навколишнього повітря і з урахуванням нього або систему замкнутих контурів з рециркуляцією сушильного повітря. Теплові насоси характеризуються можливістю використання джерел тепла при низьких температурах (на випарнику) і подачі радіатора з більш високою температурою (конденсатор). У випадку сушіння із замкнутим циклом це комбіноване теплове та холодне навантаження використовується для відновлення енергії сушіння (в основному прихованої теплоти випаровування води) і доставки цієї енергії назад у процес сушіння у вигляді зневодненого та повторно нагрітого сушильного повітря. Розподіл теплових потоків у процесі сушіння сировини із додатковою системою осушення тепловим насосом наведено на рисунку 3.1.

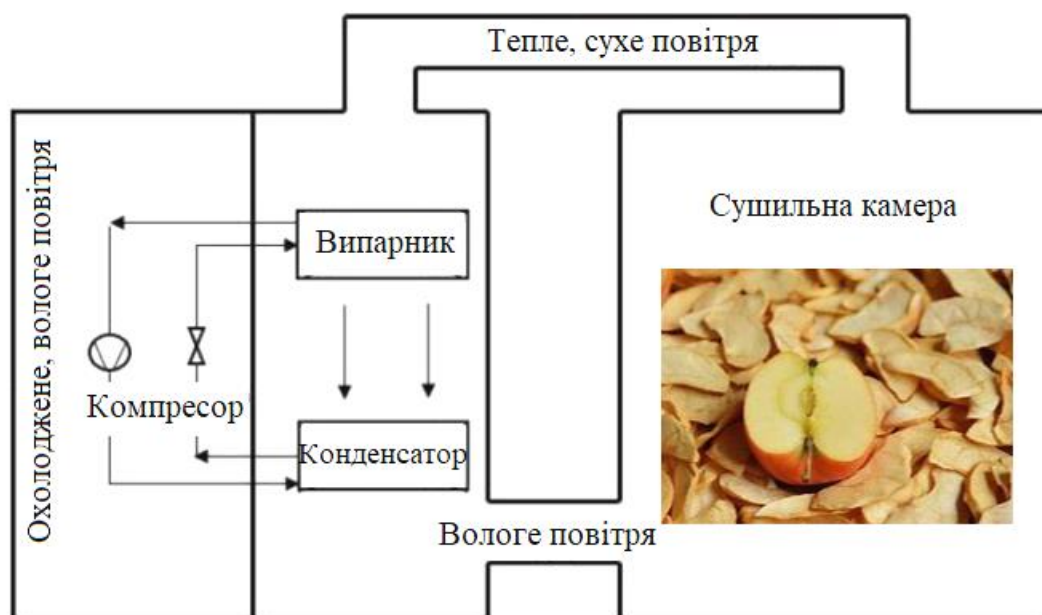


Рисунок 3.1 – Розподіл теплових потоків у процесі сушіння сировини із додатковою системою осушення тепловим насосом

Сушарка – це місце, де всередині розміщені продукти, які підлягають процесу сушіння. Гаряче повітря надходить до сушарки і віддаляючись поглинає вологу із продуктів до випарника. Цей процес відбувається безперервно і в кінцевому підсумку сировина зневоднюється.

Сушка з тепловим насосом складається з двох контурів: один контур для сушіння повітря і один цикл охолодження. У випарнику теплового насоса сушильне повітря охолоджується нижче точки роси, а волога з повітря конденсується на поверхні теплообмінника. При цьому енергія передається холодоагенту, який випаровується [9, 16, 17]. Потім холодоагент, що випарувався, стискається і може бути конденсований у конденсаторі при більш високій температурі. Таким чином, передана енергія повертається назад сушильному повітрю, яке потім знову нагрівається до початкового бажаного стану. Необхідно встановити другий, зовнішній конденсатор для того, щоб передавати надлишкове тепло з системи. Основним джерелом надлишкової енергії є компресор, який також повинен бути оснащений регулятором швидкості обертання, щоб забезпечити оптимальні умови роботи при різних навантаженнях на тепло і охолодження. Також рекомендується встановити перепускний клапан для сушіння повітря, щоб охолоджувати і повторно нагрівати тільки необхідну кількість сушильного повітря, щоб робити операцію більш ефективною.

Цей принцип також може бути використаний для сушильних систем з відкритим контуром, коли навколишнє повітря нагрівається до початкової температури сушіння за рахунок надлишку тепла від холоду та вологого сушильного повітря, яке виводиться з сушильної камери. Однак, у відкритих сушильних контурах не має можливості контролювати вологість сушильного повітря, тому більшість систем засновані на сушці по замкнутому контуру. Технологія вимагає, щоб сушильне повітря повторно нагрівалося після осушення до початкової температури сушіння. Це передбачає значне коливання температури, а субкритичні холодоагенти призведуть до високих втрат на теплопередачу через їх стабільну температуру конденсації, як тільки температура конденсації буде на кілька кельвінів вищою за температуру повітря на виході. Умови сушіння мають бути адаптовані із системою сушіння фруктів в безперервному режимі та забезпечити потенційну економію енергії у процесі сушіння з тепловим насосом.

Запропонована модель процесу сушіння для конвективної сушарки, яка працює в постійних умовах сушіння, представлена на рисунку 3.2. Система сушіння працює як сушарка із замкнутим контуром, а повітря для сушіння кондиціонується до початкової температури та вологості сушіння за допомогою теплового насоса. Тепловий насос працює з CO₂ (R744) як холодоагент. Основні об'єкти в моделі системи осушення теплового насоса (рис. 3.2). Процес розділений на дві частини: перша секція використовується для охолодження, а друга для нагрівання сушильного повітря. Система теплового насоса CO₂ також була оснащена внутрішнім теплообмінником для підвищення ефективності та контролю процесу.

Повітряне охолодження відбувалося у випарнику, а нагрівання – в газовому охолоджувачі теплового насоса. При цьому волога видалялася у випарнику шляхом конденсації. Також пропонується моніторинг і контроль даних. Для цього в сушильній камері встановлені системи контролю температури і вологості в режимі реального часу, а блок управління містить контролер і сенсорний екран. Контролер встановлений на лівій стороні

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

корпусу, електрично пов'язаний з датчиками температури та вологості, внутрішнім датчиком температури матеріалу, зовнішнім вентилятором та циркуляційним вентилятором. Сенсорна панель людино-машинного інтерфейсу розташована на передній стороні корпусу, над лівим входом для обладнання, відображаючи дані моніторингу в режимі реального часу та керуючи етапами сушіння. Сенсорний екран також електрично підключений до контролера.

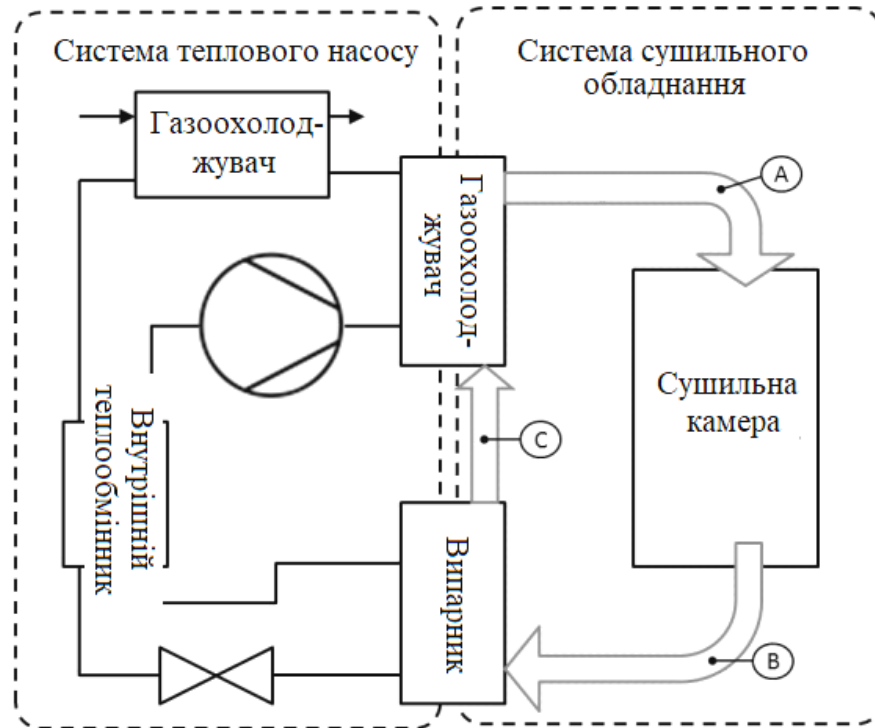


Рисунок 3.2 – Модель процесу сушіння із використанням теплового насосу [8-14]

Апаратне забезпечення системи збору та керування даними в основному складається із виконавчих компонентів, таких як промисловий персональний комп'ютер, програмований логічний контролер, датчики та інвертори. Схему процесу збору даних сушильного пристрою теплового насоса та блок управління наведено на рисунку 3.3.

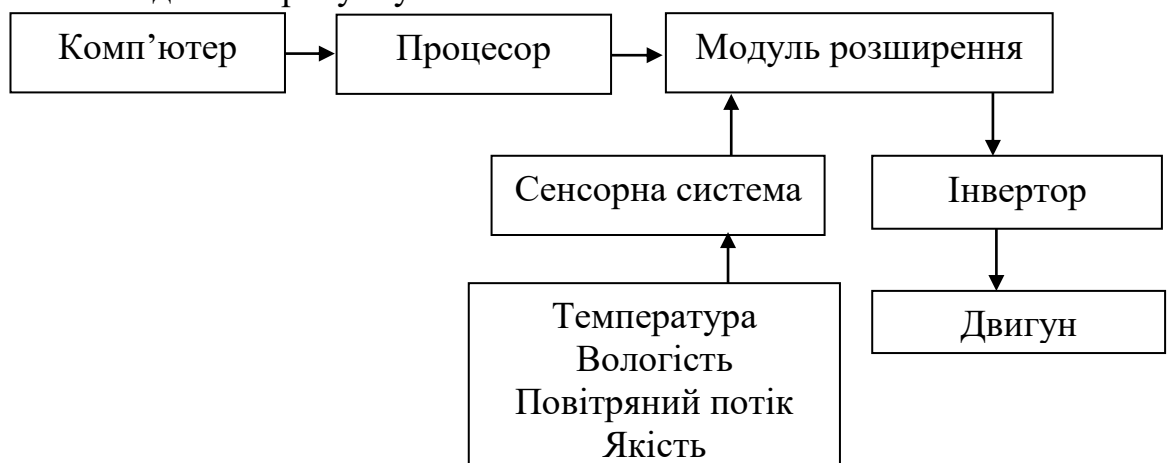


Рисунок 3.3 – Процес збору даних сушильного пристрою теплового насоса та блок управління

Система передачі даних складається з ПК, плат збору даних і різних датчиків. Шлях передачі даних поділяється на два етапи: усі сигнали датчиків сушильної платформи фільтруються та оцифровуються за допомогою відповідних методів обробки сигналів, а потім, використовуючи RS232 як протокол зв'язку, надсилає всі сигнали датчиків, що передаються на ПК.

На основі вище зазначеного можна вважати, що якість сировини досить складне поняття в харчовій промисловості. Проте, як правило, якість асоціюється з органолептичними показниками продукту, які роблять його прийнятним для споживачів. Найбільш важливими властивостями готового продукту є: структурні властивості (щільність, пористість, конкретний об'єм); оптичні властивості (колір, зовнішній вигляд); властивості текстури; термічні властивості (стан продукту: склоподібний, кристалічний); сенсорні властивості (аромат, смак, колір); харчові характеристики (вітаміни, білки); регідраційні властивості (швидкість та здатність до регідрації).

Розроблено модель процесу сушіння для конвективної сушарки, яка працює в постійних умовах сушіння. Система сушіння працює як сушарка із замкнутим контуром, а повітря для сушіння кондиціонується до початкової температури та вологості сушіння за допомогою теплового насоса. Тепловий насос працює з CO₂ (R744) як холодоагент. Процес розділений на дві частини: перша секція використовується для охолодження, а друга для нагрівання сушильного повітря. Система теплового насоса CO₂ також була оснащена внутрішнім теплообмінником для підвищення ефективності та контролю процесу.

Повітряне охолодження відбувалося у випарнику, а нагрівання – в газовому охолоджувачі теплового насоса. При цьому волога видалялася у випарнику шляхом конденсації. Також пропонується моніторинг і контроль даних. Для цього в сушильній камері встановлені системи контролю температури і вологості в режимі реального часу, а блок управління містить контролер і сенсорний екран. Контролер встановлений на лівій стороні корпусу, електрично пов'язаний з датчиками температури та вологості, внутрішнім датчиком температури матеріалу, зовнішнім вентилятором та циркуляційним вентилятором. Сенсорна панель людино-машинного інтерфейсу розташована на передній стороні корпусу, над лівим входом для обладнання, відображаючи дані моніторингу в режимі реального часу та керуючи етапами сушіння. Сенсорний екран також електрично підключений до контролера.

Запропоновано узагальнену схему процесу збору даних сушильного пристрою теплового насоса та блоку управління. Апаратне забезпечення системи збору та керування даними в основному складається із виконавчих компонентів, таких як промисловий персональний комп'ютер, програмований логічний контролер, датчики та інвертори. Система передачі даних складається з ПК, плат збору даних і різних датчиків. Шлях передачі даних поділяється на два етапи: усі сигнали датчиків сушильної платформи фільтруються та оцифровуються за допомогою відповідних методів обробки сигналів, а потім, використовуючи RS232 як протокол зв'язку, надсилає всі сигнали датчиків, що передаються на ПК.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена удосконаленню обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу. У роботі зазначено, що сушіння з тепловим насосом – це технологія за допомогою якої сировину можна сушити при низькій температурі та в безкисневій атмосфері, використовуючи менше енергії, ніж при звичайних методах сушіння. Тому є перспективною для сушіння рослинної сировини, яка є термічно чутливою до кисню. Технологія все частіше використовується в харчовій промисловості завдяки низькому споживанню енергії, меншим втратам якості та високій тепловій ефективності сушіння.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для сушіння рослинної сировини. Зазначено, що сушіння є ключовим процесом у харчовій промисловості. Велика кількість сировини сушиться для збільшення терміну придатності, зниження вартості упаковки, зниження ваги при доставці, покращення зовнішнього вигляду, збереження оригінального смаку та харчової цінності. Основна мета сушіння полягає в тому, щоб видалити вологу з продукту, щоб бактерії, дріжджі та пліснява не могли рости та псувати продукт.

Аналіз дослідження наукових джерел дав змогу виявити, що застосування теплового насоса успішно використовується для сушіння рослинної сировини. Сушіння за допомогою теплового насоса має менший час сушіння, ніж інші методи сушіння і воно просте в конструкції апаратів. Для розвитку сталої енергетики необхідні три важливі технологічні зміни: енергетична економія, підвищення ефективності виробництва, енергія та відновлення використання викопного палива за рахунок різних джерел відновлюваної енергії. У зв'язку з цим системи із використанням теплового насоса підвищують енергоефективність і спричиняють меншу витрату викопного палива. Оскільки сушіння за допомогою теплового насоса є низькотемпературним процесом сушіння, він уможлиблює подвійну перевагу перед звичайними, поширеними методами сушіння.

Тепловий насос – це пристрій, який транспортує енергію від джерела з низькою температурою до поглинача з вищою температурою. Ця передача вимагає введення роботи, яка може подаватися механічно як в циклі паростиснення або у вигляді тепла в циклі поглинання. Найбільш поширений тип теплових насосів працює за циклом паростиснення, а основний вузол складається з випарника, компресора, конденсатора і розширювального клапана.

Здійснено порівняння низькотемпературних осушувачів з тепловим насосом з іншими традиційними сушарками. Результати аналізу показали, що сушіння з тепловим насосом є альтернативним методом сушіння харчових продуктів, що призводить до кращої якості з низькою вартістю, безпечнішою в

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Антілогов</i>				Удосконалення обладнання для конвективного сушіння рослинної сировини із використанням теплового насосу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						40	2
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

експлуатації та вищою енергоефективністю. Сушіння тепловим насосом споживає лише близько половини або третини електроенергії звичайних конденсаторних осушувачів.

Другий розділ присвячено удосконаленню обладнання для конвективного сушіння із системою осушення тепловим насосом. Зазначено, що конвективні сушарки характеризуються низькою енергоефективністю, що пов'язано з великими втратами тепла. Одним з перспективних шляхів підвищення теплової ефективності конвективних сушарок є використання такого енергозберігаючого обладнання, як теплові насоси. При сушінні тепловим насосом волога, яка видаляється, не накладається сушильним агентом в навколишнє середовище і конденсується на холодній поверхні випарника та подається в рідкому вигляді. Теплота конденсації водяної пари тепловим насосом перетворюється на більш високий рівень температури і повертається в процес сушіння, що забезпечує значне зниження питомої витрати енергії в порівнянні з традиційними сушарками і сприяє зменшенню теплового «забруднення» навколишнього середовища.

Запропоновано удосконалену схему конвективного сушіння із додатковою системою осушення тепловим насосом, що сприятиме зменшенню або відновленню відпрацьованого тепла в рамках скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів.

У третьому розділі розроблено модель процесу сушіння для конвективної сушарки, яка працює в постійних умовах сушіння. Система сушіння працює як сушарка із замкнутим контуром, а повітря для сушіння кондиціонується до початкової температури та вологості сушіння за допомогою теплового насоса. Тепловий насос працює з CO₂ (R744) як холодоагент. Процес розділений на дві частини: перша секція використовується для охолодження, а друга для нагрівання сушильного повітря. Система теплового насоса CO₂ також була оснащена внутрішнім теплообмінником для підвищення ефективності та контролю процесу. Повітряне охолодження відбувалося у випарнику, а нагрівання – в газовому охолоджувачі теплового насоса. При цьому волога видалялася у випарнику шляхом конденсації. Також пропонується моніторинг і контроль даних. Для цього в сушильній камері встановлені системи контролю температури і вологості в режимі реального часу, а блок управління містить контролер і сенсорний екран.

Запропоновано узагальнену схему процесу збору даних сушильного пристрою теплового насоса та блоку управління. Усі сигнали датчиків сушильної платформи фільтруються та оцифровуються за допомогою відповідних методів обробки сигналів, а потім, використовуючи RS232 як протокол зв'язку, надсилає всі сигнали датчиків, що передаються на ПК.

Вважається, що показники якості сировини у процесі сушіння із застосуванням теплового насосом набагато вищі, ніж при сушінні традиційними сушарками, а саме: структурні властивості (щільність, пористість, об'єм); оптичні властивості (колір, зовнішній вигляд); властивості текстури; термічні властивості (стан продукту: склоподібний, кристалічний); сенсорні властивості (аромат, смак, колір); харчові характеристики (вітаміни, білки); регідраційні властивості (швидкість та здатність до регідрації).

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Review on low-temperature heat pump drying applications in food industry: Cooling with dehumidification drying method. URL: <https://www.researchgate.net/publication/343895208>.
2. Heat pump drying of fruits and vegetables. URL: <https://www.researchgate.net/publication/289586372>.
3. Arun S. Mujumdar. Advances in drying science and technology: handbook of drying of vegetables and vegetable products. New York: CRC Press, 2017. 556 p.
4. Overview of heat pump-assisted drying systems. Part I: Integration, control complexity and applicability of new innovative concepts. URL: <https://www.researchgate.net/publication/272001495>.
5. Використання теплових насосів у процесах сушіння. Режим доступу: <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61397/15-Snezhkin.pdf>.
6. Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування. Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6436/1/27.pdf>.
7. Снежкін Ю.Ф. Зниження енерговитрат при переробці фруктово-овочевої сировини. Наук. праці ОНАХТ. Одеса, 2006. Вип. 28. Т.2. С.71-73.
8. Розвиток відновлювальних джерел енергії в Україні // Інформаційний портал Житло. Режим доступу: <http://www.zhytlo.in.ua>.
9. Performance simulation of a heat pump drying system using R744 as refrigerant. URL: <https://www.researchgate.net/publication/314096009>.
10. Research in low-temperature heat pump drying. URL: <https://www.researchgate.net/publication/343895208>.
11. Energy performance of convective dryers. URL: <https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/2012-104.pdf>.
12. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання / Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О. К.: Поліграф-Сервіс, 2009. 104 с.
13. Теплонасосні технології низькотемпературного сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми. Режим доступу: <https://pdfs.semanticscholar.org/c2f3/9c5da6b523b5d2ed02a5f231277eda2d7fb4.pdf>.
14. Оцінка можливості використання теплових насосів різних типів в енергозберігаючих технологіях. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/372737542>.
15. Безродний М. К., Притула Н. О. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія. К., 2016. С. 44-165.
16. Яковчук П.Є., Цяпа В.Б., Комаров В.І. Тепловий насос як елемент енергозбереження. Режим доступу: https://vlp.com.ua/files/34_3.pdf.
17. Ігнатенко В.М. Основи молекулярної фізики та термодинаміки. Суми: Сумський державний університет, 2007. 246 с.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier. URL: https://www.academia.edu/7581668/Low_Temperature_Drying_Using_a_Versatile_Heat_Pump_Dehumidifier.
19. Case studies of thermally driven heat pump assisted drying. URL: <https://www.academia.edu/87329972>.
20. Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products. URL: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.1>.
21. A review of heat pump drying: part 1 – systems, models and studies. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890409001691>.
22. Optimization of the beef drying process in a heat pump chamber dryer. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/4927>.
23. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/142361/07>.
24. Ткаченко С.Й. Сушильні процеси та установки. Вінниця: ВНТУ. 2008. 98 с.
25. Ярош Я.Д. Аналіз сучасного обладнання для низькотемпературного сушіння сільськогосподарських матеріалів // Вісник ЖНАЕУ. 2016. № 2 (56). С. 273–280.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43