

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

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробних і харчових
виробництв»

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

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ
ВИРОБНИЦТВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ
ЕНЕРГІЇ»**

Виконала:

здобувачка вищої освіти _____ Корінь Карина Олександрівна _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

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

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2026

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

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

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

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

Корінь Карині Олександрівні
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії»

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

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

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

3. Вихідні дані до роботи:

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

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Альтернативні технології сушіння рослинної сировини.
3. Оптимізація конвекційної сушарки з тепловим насосом.
4. Аналіз результатів досліджень.
5. Висновки.

6. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень):
Відновлювані джерела енергії в процесі сушіння.
Оптимізація конвекційної сушарки з тепловим насосом.
6. Дата видачі завдання «02» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Альтернативні технології сушіння рослинної сировини	16.02.2026-10.03.2026
3	Оптимізація конвекційної сушарки з тепловим насосом	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Корінь К.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Омельченко О.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 8 рисунків, 1 таблицю. Список використаних джерел складається з 30 найменувань.

Об'єкт роботи – тепловий насос.

Предмет роботи – процес сушіння за допомогою теплового насосу.

Мета роботи – удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії.

У роботі зазначено, що традиційні джерела енергії, що використовуються в переробці харчової сировини мають значні екологічні наслідки, включаючи викиди парникових газів. Інтеграція відновлюваних джерел енергії у підприємства харчової промисловості пропонує безліч переваг, що охоплюють економічні та екологічні аспекти, що призводить до суттєвих екологічних переваг шляхом зменшення викидів парникових газів. Використання чистих джерел енергії сприяє зниженню викидів вуглецю, допомагаючи підприємствам відповідати цілям сталого розвитку та нормативним вимогам.

На основі аналізу, було зазначено, що використання теплових насосів є фундаментальним для збереження навколишнього середовища, оскільки зменшують використання палива, викиди CO₂ та споживання енергії у порівнянні із сушарками, що використовують електричні нагрівальні елементи.

Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря.

Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння, яка є відкритою підсистемою через обмін енергією з тепловим насосом. Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння.

Оптимізовано систему контролю включає: датчик контролю температури та відносної вологості з реєстратором даних на виході випарника; датчик на виході конденсатора для контролю температури та вологості повітря після його нагрівання; датчик у центральній частині камери сушіння для моніторингу температури та вологості на продукті; датчик на виході камери сушіння, щоб знати вологість повітря та температуру після циклу дегідратації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сушіння, відновлювані джерела енергії, тепловий насос, рослинна сировини.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АЛЬТЕРНАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Методи сушіння рослинної сировини	7
1.2 Відновлювані джерела енергії в процесі сушіння	12
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНВЕКЦІЙНОЇ СУШАРКИ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ	25
2.1 Обґрунтування основних компонентів теплового насоса	25
2.2 Структурна схема процесу сушіння з тепловим насосом	33
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1 Параметри якості сировини сушеною тепловим насосом	39
3.2 Контроль температури в сушарці з тепловим насосом	40
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Корінь			Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії				Лім.	Арк.	Аркуші		
Перевір.		Омельченко									5	1	
Н. Контр.		Омельченко							ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Затверд.		Цвіркун											

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що традиційні джерела енергії, що використовуються в переробці харчової сировини мають значні екологічні наслідки, включаючи викиди парникових газів. Тому є необхідність в застосуванні відновлювальних джерел енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії у підприємства харчової промисловості пропонує безліч переваг, що охоплюють економічні та екологічні аспекти, що призводить до суттєвих екологічних переваг шляхом зменшення викидів парникових газів. Використання чистих джерел енергії сприяє зниженню викидів вуглецю, допомагаючи підприємствам харчової промисловості відповідати цілям сталого розвитку та нормативним вимогам.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що використання теплових насосів є фундаментальним для збереження навколишнього середовища, оскільки вони зменшують використання палива та викиди CO₂, зменшують споживання енергії у порівнянні із сушарками, що використовують електричні нагрівальні елементи.

Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря.

Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння, яка є відкритою підсистемою через обмін енергією з тепловим насосом. Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння.

Оптимізовано систему контролю включає: датчик контролю температури та відносної вологості з реєстратором даних на виході випарника; датчик на виході конденсатора для контролю температури та вологості повітря після його нагрівання; датчик у центральній частині камери сушіння для моніторингу температури та вологості на продукті; датчик на виході камери сушіння, щоб знати вологість повітря та температуру після циклу дегідратації.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Корінь</i>				Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						6	1
						ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>							

РОЗДІЛ 1

АЛЬТЕРНАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

1.1 Методи сушіння рослинної сировини

Сушіння використовувалося як метод збереження в харчовій промисловості. Головна мета будь-якого процесу сушіння – отримати сухий продукт бажаної якості за мінімальні витрати і максимальний вихід, оптимізуючи конструкцію та умови роботи обладнання, що використовується для сушіння продуктів. Сушіння продуктів харчування вважається відмінним варіантом для обробки та збереження харчових продуктів відповідно до стандартів якості та норм, водночас зменшуючи споживання традиційного палива, покращуючи якість продуктів і дбаючи про навколишнє середовище. Ця інтенсивна операція потребує енергії, яка споживає від 9 до 25% [1-3, 10]. Тому, щоб зменшити споживання енергії, спожиту на одиницю вологи продукту, необхідно розглянути різні методи сушіння, а також різне обладнання для сушіння залежно від конкретної операції та мети процесу сушіння продуктів. Операції сушіння дуже різноманітні, їх основна відмінність полягає в методології, що використовується у процесі при цьому спільною метою є видалення вологи, що міститься у продуктах, а варіанти цих методів зумовлені в основному обробкою продукту, середовищем, типом енергії, що використовується у процесі сушіння та контрольованими умовами цього процесу.

Основною метою сушіння є зменшення вологості продуктів, щоб забезпечити більш тривалі терміни зберігання. Вода відіграє дуже важливу роль у складі продуктів, оскільки складає більшу частину їх і є життєво необхідною для збереження свіжості, кольору та аромату; аналогічно, вода у продуктах визначає мікробну та фізико-хімічну активність, які є основними елементами, що призводять до розкладу продуктів. Серед основних методів зневоднення продукту маємо: сушіння на сонці, конвекція гарячим повітрям, мікрохвильова обробка, ліофілізація, розпилення, осмотичне зневоднення тощо [10].

Сушіння – це процес видалення води, що міститься у рослинній сировині з метою збільшення його збереженості та стабільності, зменшення ваги та об'єму, а також концентрації смаку та поживних речовин. Існують різні методи сушіння, серед яких [4, 29-30]:

– сушіння на сонці є найпоширенішим та традиційним метод, який полягає у розкладанні рослинної сировини на рівній та чистій поверхні, виставленій на сонці протягом декількох днів, час від часу перемішуючи їх для забезпечення рівномірного висушування. Сушіння на сонці може тривати від 5 до 12 днів, залежно від кліматичних умов та відносної вологості навколишнього

на вколішнього					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії						Літ.	Арк.	Аркуші	
Розроб.		Корінь											7	18
Перевір.		Омельченко												
Н. Контр.		Омельченко												
Затверд.		Цвіркун			ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО									

середовища;

– сушіння в шафі є більш контрольований та швидкий метод, ніж сушіння на сонці, який полягає у розміщенні сировини в печі за низької та стабільної температури, з потоком гарячого повітря, що циркулює над зернами для їх дегідратації. Сушіння в шафі може тривати від 24 до 48 годин, залежно від типу використовуваної печі;

– сушіння гарячим повітрям – метод, який використовує тепло енергетичного джерела для зневоднення рослинної сировини. Гаряче повітря спрямовується на зерна какао для видалення вологи та зменшення вмісту води. Цей процес можна проводити у сушарці з псевдозрідженим шаром або у барабанній ротаційній сушарці;

– сушіння методом ліофілізації – метод, який полягає в тому, щоб спочатку заморозити плоди, а потім піддати їх негативному тиску, що дозволяє відбуватися сублімації води, присутньої у фрукті, без переходу її в рідкий стан. Це дорого і складно, але майже повністю зберігає смак, аромат, текстуру та поживні речовини; використовується у виробництві високоякісних продуктів харчування з доданою вартістю.

Сушіння полягає у відділенні кількості води або іншої рідини від сировини з метою зменшення відсотка вологості до бажаного значення. Продукт, що підлягає сушінню, може витримувати високі температури або вимагати делікатного оброблення при низьких температурах. Через це на ринку існує велика кількість комерційних типів сушарок. Їх класифікують згідно з тим, як твердий матеріал рухається через зону сушіння, методом передачі тепла та обсягом або розміром продукту, що сушиться.

Конвекційні сушарки – це обладнання, що використовується для сушіння продуктів харчування, яке використовує гаряче повітря з метою видалення вологи з продуктів, що підлягають дегідратації. Конвекційні сушарки можна класифікувати на два типи: сушарки типу поперечного потоку та сушарки типу паралельного потоку. Сушарки поперечного потоку, також називані сушарками з лотками, складаються з серії перфорованих лотків, складених вертикально. Продукти, що підлягають дегідратації, розміщують у лотках і гаряче повітря циркулює [4, 10]. У конвективних сушарках процес зневоднення відбувається завдяки конвективному руху гарячого повітря сушіння, яке вступає в контакт з продуктом, поглинає його вологу та виводить її з нього сушильна камера. Деякі приклади гарячих газів: повітря, інертні гази, водяна пара. У дегідраторах, які працюють за принципом конвекції, споживання енергії є вищим, коли потрібна менша залишкова вологість продукту. Сушильне обладнання може бути безперервними або переривчастими, залежно від їхньої виробничої потужності та типу продукту, що висушується.

Вертикальна роторна сушарка – це різновид конвекційної сушарки, яка використовується для зневоднення харчових продуктів. Сушарка має обертовий вертикальний барабан, який дозволяє гарячому повітрю виходити через матеріали, що сохнуть. Вертикальний барабан має діаметр від 1 до 6 метрів, а довжина може бути в кілька разів більшою. В середині барабан оснащений різними типами лопаток або ребер, які дозволяють змішувати та переміщувати

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

матеріали під час сушіння. Вертикальна роторна сушарка працює шляхом подачі гарячого повітря через конфорку внизу барабана [4, 29-30]. Гаряче повітря циркулює вгору через сушильні матеріали, видаляючи воду та зменшуючи вміст вологи. Гаряче повітря викидається вентилятором і циклом, а сухий матеріал викидається через дно барабана. Вертикальна ротаційна сушарка використовується в харчовій промисловості для сушіння продуктів, таких як фрукти, овочі, зернові, горіхи, трави та спеції. Цей тип сушарки має кілька переваг, зокрема здатність обробляти великі обсяги насипних матеріалів, енергоефективність, контроль часу і температури сушіння, а також простоту обслуговування та очищення.

Обертові сушарки є одними з найбільш часто використовуваних форм для сушки, оскільки має широкий спектр матеріалів на промисловому рівні та низьку собівартість на одиницю при великих обсягах. Складається з порожнього циліндра, який обертається навколо своєї осі, маючи невеликий нахил для того, щоб тверді речовини, що підлягають сушінню, могли ковзати до вихідного отвору [4, 5]. Вологий матеріал просувається під дією сили тяжіння завдяки нахилу та обертанню, щоб згодом вийти сухим на протилежному кінці. Потік гарячого повітря може бути паралельним або протитечією. Горизонтальна роторна сушарка – це тип конвекційної сушарки, що використовується для зневоднення харчових продуктів та інших насипних матеріалів. Сушарка характеризується горизонтальним барабаном, який обертається по поздовжній осі. Барабан має циліндричну форму і поділений на секції, які можуть бути оснащені різними типами піддонів, плавників або підйомних елементів, які дозволяють сушити матеріали для переміщення та змішування.

Горизонтальна ротаційна сушарка працює, подаючи гаряче повітря через конфорку спереду барабана. Гаряче повітря циркулює через сушильні матеріали, видаляючи воду та зменшуючи вміст вологи. Гаряче повітря викидається вентилятором і циклом, а сухий матеріал викидається в задню частину барабана [4, 30]. Горизонтальна ротаційна сушарка використовується в харчовій промисловості для сушіння продуктів, таких як зернові, крупи, фрукти, овочі, м'ясо, риба та молочні продукти. Цей тип сушарки має кілька переваг, зокрема здатність обробляти великі обсяги насипних матеріалів, етичну енергоефективність, можливість контролювати час і температуру сушіння, а також простоту обслуговування та очищення. Крім того, горизонтальна роторна сушарка підходить для матеріалів різних форм і розмірів, оскільки підйомні елементи дозволяють переміщувати та змішувати матеріали під час сушіння.

Сушарка з паралельним потоком – це тип обладнання, яке використовується в промисловості для сушіння рослинної сировини. Як випливає з назви, цей тип сушарки використовують лотки, розташовані паралельно, через які наповнюється гарячий газ для сушіння запахів. Процес сушіння починається з завантаження у піддони для сушарки. Гарячий газ потім впорскується через повітрозабірник на дні сушарки, створюючи паралельний потік через лотки у повітряний вихід у верхній частині сушарки. Цей теплий газ

проходить через сировину в лотках і сушити їх, коли гарячий газ контактує з ними. Крім того, це популярний вибір, оскільки він простий у використанні та не потребує потреби в догляді [4, 5]. Лоткова сушарка складається з металевого прямокутного корпусу, достатньо великого, щоб розмістити матеріали для сушіння. Вона має неглибокі лотки (з глибиною від 10 до 100 мм) на які поміщається продукт для сушіння. Лотки можуть бути перфорованими, щоб збільшити площу контакту між повітрям і твердим тілом, скорочуючи час процесу. Сушіння полягає в пропусканні гарячого сухого повітря через вентилятор до лотків. Повітря, як правило, нагрівається ненасиченою парою, що забезпечує ефективне сушіння.

Сушарка з лотками типу тунель – це тип обладнання, що використовується в промисловості для сушіння твердих матеріалів у великих обсягах. Цей тип сушарки використовує серію лотків, розташованих у тунелі, що нагрівається гарячим повітрям для сушіння твердих матеріалів. Він подібний до сушарки для лотків але працює напівбезперервно. Складається з тунелю, через який проходять лотки з матеріалом для сушіння. Потім пропускають гаряче повітря (зазвичай у протилежному напрямку), щоб висушити продукт. У такого типу сушарки площа поверхні не має великого значення, оскільки швидкість повітря та час перебування варіюються в дуже широкому діапазоні [4, 5, 29]. Процес сушіння починається з завантаження твердих матеріалів у сушильні лотки, які розміщуються на візках, що рухаються по тунелю. Гаряче повітря подається в нижню частину тунелю і циркулює через лотки, сушаючи тверді матеріали за допомогою гарячого повітря. У міру того як візки просуваються тунелем, тверді матеріали все більше висихають, поки не досягають кінця тунелю і повністю не висохнуть. Це популярний варіант для сушіння великих об'ємів матеріалу, оскільки дозволяє здійснювати безперервний та ефективний процес. Крім того, його можна налаштувати на рециркуляцію гарячого повітря для більш ефективного процесу та меншого енергоспоживання.

Сушарка з псевдозрідженим шаром – це тип сушарки зазвичай використовується в харчовій промисловості для сушіння гранульованих та порошкоподібних продуктів. Процес сушіння в сушарці з псевдозрідженим шаром починається з завантаження твердих матеріалів у сушильну камеру, оснащену пористим шаром. Гарячий газ подається через пористий шар, роблячи його рухливим і створюючи змішувальний ефект, який допомагає висушити тверді матеріали, коли гарячий газ контактує з ними [29-30]. Гарячий газ також можна повторно використовувати для підвищення ефективності процесу сушіння та зниження енергетичних витрат. Це популярний варіант, оскільки він дозволяє швидко та рівномірно сушити матеріали, з можливістю точно контролювати температуру та час сушіння; завдяки його конструкції тверді матеріали можна сушити, не пошкоджуючи їх і не руйнуючи, що важливо для чутливих до тепла матеріалів.

Сушарка з нерухомим шаром – це обладнання, яке використовується для сушіння твердих матеріалів у якому матеріал, що підлягає сушінню, розміщується в нерухомому шарі, а через нього проходить потік гарячого повітря. Гаряче повітря проходить через шар за допомогою каналів або отворів,

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

розташованих у нижній частині установки, і виходить через верхню частину. Під час цього процесу гаряче повітря поглинає вологу з матеріалу та випаровує її, знижуючи вологість матеріалу до бажаного рівня. Сушарки з нерухомим шаром зазвичай використовуються в процесах сушіння продуктів харчування та інших твердих матеріалів. Їх проста конструкція та низька вартість роблять їх привабливими для багатьох процесів сушіння [4, 5]. Барабанна сушарка складається з одного або двох барабанів, які виготовлені з нержавної сталі (установлених горизонтально). На стінках випаровується рідина, тоді як металева лопать повільно зчищає тверду речовину, що потрапляє на конвеєри, розташовані знизу. Випарована вологість відводиться через витяжку, розташовану над барабанами. Вони типові для роботи з пастами, суспензіями та розчинами. Барабан є своєрідним гібридом між випарником і сушаркою.

Сушарка з тепловим насосом – це тип обладнання, що використовується в промисловості для сушіння твердих речовин. Цей тип сушарки використовує тепловий насос для генерації гарячого повітря, яке використовується для сушіння матеріалів. Процес сушіння в сушарці з тепловим насосом починається із завантаження твердих речовин у камеру сушіння. Після цього гаряче повітря, згенероване тепловим насосом, впорскується в камеру, сушачи тверді речовини при контакті з гарячим повітрям [13]. Тепловий насос рециркулює та відновлює гаряче повітря, підвищуючи ефективність процесу сушіння та знижуючи енергетичні витрати. Це популярний варіант, оскільки дозволяє швидко та ефективно сушити з можливістю точно контролювати температуру та час сушіння. Доцільно використовувати відновлюване джерело енергії, таке як тепловий насос, бо воно має низький вплив на навколишнє середовище та є більш стійким варіантом порівняно з іншими типами сушарок.

Сушильна камера відноситься до приміщення на виробничому або переробному підприємстві, де висушуються продукти або матеріали. Ці сушильні камери можна спроектувати для сушіння різноманітних матеріалів, таких як продукти харчування та сільськогосподарські матеріали. Наприклад, у харчовій промисловості сушильні камери використовуються для сушіння фруктів, овочів, зернових, м'яса та інших продуктів для їхнього зберігання та тривалого збереження [4, 29-30]. Сушильні камери можуть бути обладнані спеціалізованим обладнанням, таким як сушарки гарячим повітрям, вакуумні сушарки, сушарки для лотків та інше сушильне обладнання, щоб забезпечити швидке та рівномірне сушіння. Також вони можуть мати системи контролю температури та вологості, щоб гарантувати ефективність процесу сушіння. Сушарки в промисловості є спеціалізованими приміщеннями для сушіння різноманітних матеріалів і є важливими для забезпечення якості та тривалості зберігання виготовлених продуктів.

Сонячна сушарка – це система, яка використовує сонячне випромінювання для сушіння продуктів або матеріалів, таких як фрукти, овочі, зернові, одяг та інші продукти, що потрібно сушити для зберігання або подальшого використання. Цей тип сушіння є більш стійкою та економічною альтернативою звичайним сушаркам, які використовують викопне паливо або електроенергію. Сонячні сушарки працюють шляхом захоплення сонячної

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

енергії через сонячні панелі або пристрої для рекуперації тепла, які нагрівають повітря, що використовується для сушіння продуктів. Сонячні сушарки можуть бути різних типів, наприклад, сушарки на лотках або тунельні сушарки. Важливою перевагою сонячної сушарки є те, що вона не викидає парникові гази і не виробляє токсичних відходів, що робить її більш екологічною та сталою, ніж звичайні сушарки.

1.2 Відновлювані джерела енергії в процесі сушіння

Індустрія переробки продуктів харчування відіграє важливу роль у задоволенні глобальних потреб у їжі, проте вона також споживає значні обсяги енергії, переважно з традиційних і часто невідновлюваних джерел. Оскільки занепокоєння щодо екологічної сталості та вартості енергії зростає, інтеграція відновлюваних джерел енергії у підприємства з переробки продуктів харчування стала перспективним рішенням [1-3, 16, 17]. Інтеграція джерел відновлюваної енергії на підприємствах з переробки харчових продуктів пропонує перспективний шлях до сталого розвитку та зменшення впливу на довкілля. Відновлювані джерела енергії сьогодні відіграють велику роль у світі, що пов'язано з тим, що невідновлювані джерела енергії, такі як викопне паливо вичерпуються. Серед основних типів відновлюваних джерел енергії є: вітрова, геотермальна, біомаса, гідравлічна та сонячна. Деякі види відновлюваних джерел енергії наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Огляд відновлюваних джерел енергії

Джерело енергії	Характеристики	Застосування в харчовій промисловості
Сонячна енергія	Перетворення сонячного світла на електроенергію	Живлення обладнання для обробки сировини, нагрівання води
Вітрова енергія	Використання вітру для виробництва енергії	Виробництво електроенергії, що доповнює енергопостачання мережі
Енергія біомаси	Використання органічних матеріалів для енергії	Виробництво тепла і електроенергії, перетворення відходів у енергію

Традиційні джерела енергії, насамперед викопне паливо та електроенергія з мережі тривалий час були домінуючими джерелами енергії на підприємствах харчової промисловості. Проте традиційні джерела енергії, що використовуються у переробці харчових продуктів, мають значні екологічні наслідки, включаючи викиди парникових газів. Тому є необхідність в застосуванні відновлювальних джерел енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії у підприємства харчової промисловості пропонує безліч переваг, що охоплюють економічні, екологічні та нормативні аспекти [16]. Однією з основних переваг інтеграції відновлюваних джерел енергії на підприємствах харчової промисловості є потенціал значної економії витрат бо,

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

використовуючи відновлювані джерела, такі як сонячна та вітрова енергія, підприємства можуть зменшити свої витрати на енергію та досягти довгострокової фінансової стабільності. Також інтеграція відновлюваної енергії призводить до суттєвих екологічних переваг шляхом зменшення викидів парникових газів та зниження екологічного сліду харчової промисловості. Використання чистих джерел енергії сприяє зниженню викидів вуглецю, допомагаючи підприємствам харчової промисловості відповідати цілям сталого розвитку та нормативним вимогам.

Збереження продуктів харчування шляхом сушіння є однією з найдавніших технік але водночас це практична діяльність із високими енергетичними витратами, оскільки використовується спалювання палива або електрична енергія для генерації тепла. Зазначається, що від 10 до 15% енергії, що використовується в промисловості, йде на операції сушіння. Процес сушіння здійснюється за допомогою різних технік, таких як конвективне сушіння, сушіння під вакуумом або ліофілізація, які потребують високого споживання енергії [1-3, 10]. Проте сушіння є одним із енергоємних процесів, який використовується у багатьох галузях, зокрема в харчовій промисловості, що є основним сектором, де сушіння широко використовувалося для збереження злаків, фруктів та овочів. Волога є основною речовиною у вологих матеріалах, яка спричиняє мікробні та бактеріальні реакції, що призводять до псування матеріалу. Зменшення вмісту вологи до безпечного рівня знижує ризик та розмноження мікроорганізмів і може бути досягнуте лише за допомогою сушіння. Теплова енергія є джерелом, що в основному використовується для процесу сушіння. Здебільшого для сушіння використовувалися традиційні джерела енергії, такі як викопне паливо та електрична енергія.

Обладнання для зневоднення, що використовує тепловий насос, застосовувалося у харчовій промисловості для сушіння продуктів харчування, оскільки вони працюють із низьким енергоспоживанням.

1. Сушіння за допомогою теплового насоса. У сушінні за допомогою теплового насоса є відчутна перевага серед інших сушарок для продуктів: тепловий насос має здатність відновлювати приховане та відчутне тепло шляхом конденсації вологи з повітря для сушіння, чого не можуть робити інші методи сушіння. Тепло, що генерується, повторно циркулює назад у сушарку шляхом нагрівання зневодненого повітря для сушіння. Таким чином, енергоефективність значно зростає в результаті відновлення циркулюючого тепла, яке інакше було б втрачено в атмосферу при використанні інших традиційних сушарок [10]. Це дозволяє здійснювати сушіння при нижчих температурах, що призводить до того, що деякі продукти не змінюють свої фізичні властивості, також ця система представляє менші експлуатаційні витрати, навіть коли умови навколишнього середовища більш вологі.

Теплові насоси – це теплові машини, які використовуються для різних застосувань, були впроваджені в 1950-х роках і з часом удосконалені до того, що на сьогодні стали більш ефективними, безпечними та конкурентоспроможними технологіями. Теплові насоси еволюціонували до того, щоб стати ефективною технологією, оскільки вони дозволяють

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

кліматизувати різні приміщення, забезпечуючи охолодження або обігрів. Цей процес досягається шляхом використання енергії з природного середовища та її перенесення за допомогою рідини, що називається холодоагентом, який поглинає та віддає тепло при переході з газоподібного стану в рідкий і навпаки, працюючи у зворотному термодинамічному циклі Карно. Як і система охолодження має чотири основні компоненти [11, 13]:

- конденсатор – компонент віддає тепло в навколишнє середовище, внаслідок чого холодоагент змінює свій стан при конденсації;
- випарник, який за допомогою поглинання тепла від навколишнього середовища холодоагент повністю випаровується всередині цього компонента;
- компресор забезпечує те, що холодоагент у газоподібному стані засмоктується цим елементом, що підвищує його тиск і, як наслідок, температуру, завдяки компресору система рухається, оскільки це єдиний компонент, який споживає електроенергію;
- розширювальний клапан дає можливість холодоагенту частково розширюватися під час поглинання тепла, що призводить до його охолодження перед входом у випарник.
- чотирьохходовий клапан дозволяє циклу бути зворотним і є тим, що відрізняє його від холодильної схеми, забезпечуючи подачу холоду або тепла з будь-якої сторони випарника або конденсатора.

Коли використовується сушильне обладнання з тепловим насосом, легше контролювати вологість і температуру повітря, а також відновлення тепла. Завдяки цьому отримують продукти кращої якості, зберігаючи їх фізичні та хімічні властивості і здійснюється ефективно використання енергії. Розташування компонентів типової технології сушіння з тепловим насосом показано на рисунку 1.1. Повітря для сушіння зневоднюється у випарнику і повторно нагрівається до бажаної температури в конденсаторі перед його подальшим проходженням через матеріал, тим самим пропонуючи перевагу кращої швидкості сушіння та якості продукту порівняно з традиційним сушінням [10, 13].

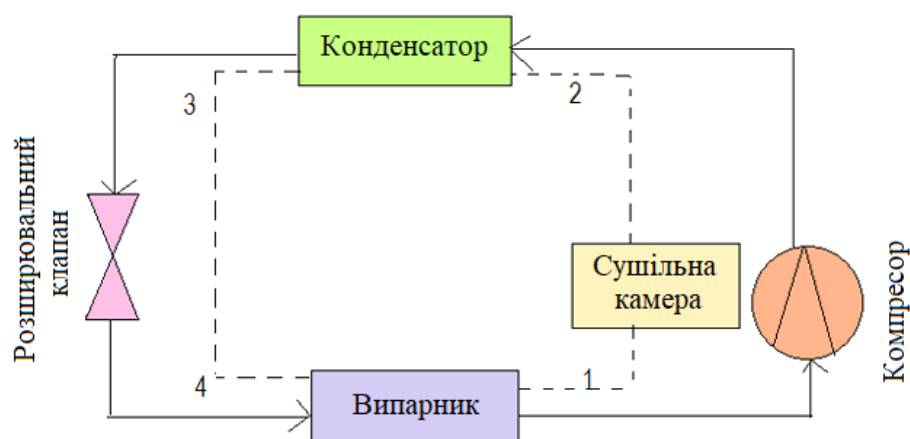


Рисунок 1.1 – Розташування компонентів сушарки з тепловим насосом

Робоча рідина, яка називається холодоагентом, поглинає тепло з

навколишнього середовища, яке знаходиться при низькій температурі. Процес здійснюється через теплообмінник – компонент у системі теплового насоса, який називається випарником, оскільки в обладнанні холодоагент випаровується, поглинаючи тепло від середовища або продуктів. Після поглинання тепла газоподібний холодоагент засмоктується компресором, який підвищує тиск і температуру [7-9, 10, 11]. Зі збільшенням тиску також збільшується температура насичення холодоагенту, отже, він буде придатний для конденсації при вищій температурі. Використовуючи підвищену температуру насичення, робоча рідина надходить до нового теплообмінника, де передає тепло і конденсується. Цей другий теплообмінник отримав назву конденсатор через зміну, яку зазнає холодоагент всередині цього елемента. Передане тепло, гіпотетично, це тепло, всмоктане додатково до зовнішньої виконаної роботи. Цикл закінчується, коли виконується протилежне у компресорі, знижуючи тиск холодоагенту за допомогою так званого розширювального клапана, щоб повернутися знову до випарника і таким чином завершити традиційний цикл охолодження.

Існують різні способи застосування сушіння за допомогою теплового насоса. Способи включають варіювання наступного: режим роботи, цикл теплового насоса, засоби сушіння, робота сушарки з тепловим насосом, кількість ступенів теплового насоса та температура для сушіння. Однією з переваг теплового насоса над іншими джерелами тепла для сушіння є те, що його можна застосовувати до будь-якого типу сушарок. Будь-яка сушарка, яка використовує конвекцію як основну функцію подачі тепла, може бути оснащена відповідно сконструйованим тепловим насосом, але сушарки, які потребують великих обсягів сушильного повітря не підходять для роботи з тепловим насосом. Технологія сушіння за допомогою теплового насоса була поєднана з іншими методами сушіння для мінімізації деяких проблем, що виникають у цих методах і водночас забезпечує кращу якість продукту. Серед переваг, що було виявлено при її використанні є наступні [10]: менше енергоспоживання, високий коефіцієнт корисної дії, висока теплова ефективність.

Прикладами сушіння за допомогою теплового насоса є сушіння з допомогою теплового насоса, мікрохвильове сушіння, інфрачервоне сушіння, сушіння у псевдозрідженому шарі, атмосферна ліофілізація, сушіння за допомогою радіочастот з використанням теплового насоса (рис. 1.2). Цей тип сушіння корисний для теплочутливих матеріалів, таких як фрукти, овочі, насіння, м'ясо тощо, що потребують лише низької температури. Наприклад, поєднання теплового насоса зі сонячною сушаркою покращує процес дегідратації та знижує витрати. Тепловий насос доцільно використовувати, оскільки можна отримати більше теплової енергії, ніж енергії він споживає, бо ця енергія може бути: електричною або від спалювання палива. Також система зосереджена на використанні контрольованих і закритих середовищ, що висушують чутливі матеріали, такі як сільськогосподарська продукція [10, 13]. Ще однією перевагою обладнання для дегідратації з тепловим насосом є те, що його можна пристосувати до обладнання за розташуванням, формою та розміром, що значно покращує продуктивність сушарки. Також дизайн

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

теплового насоса має перевагу безперервної роботи, що дозволяє забезпечити оптимальні та стабільні умови роботи.

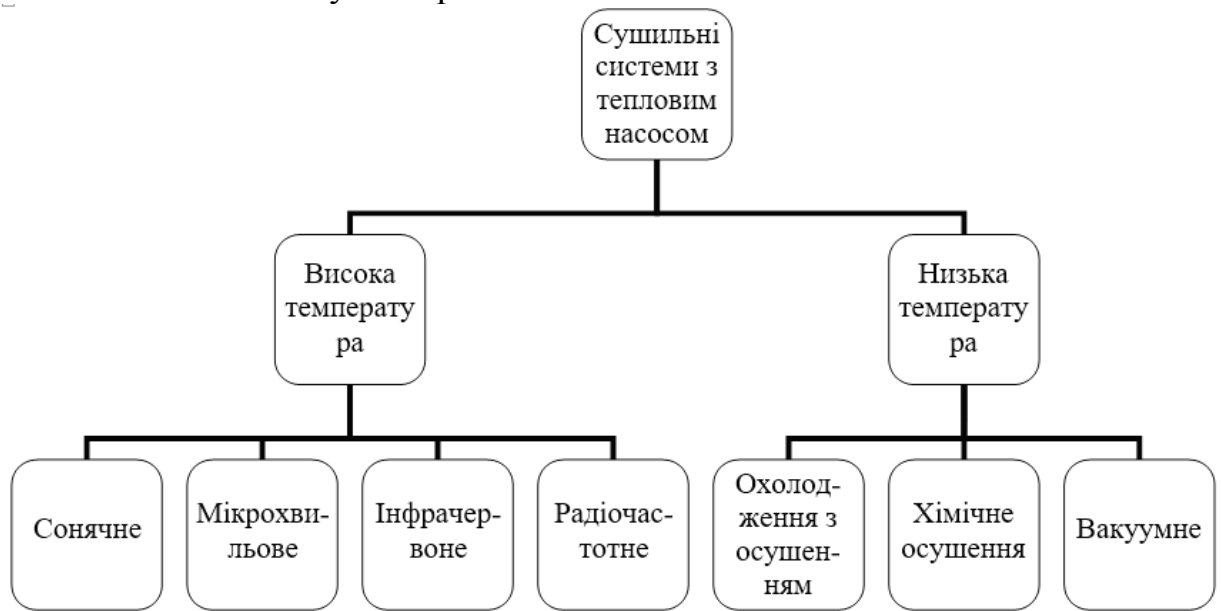


Рисунок 1.2 – Класифікація систем сушіння з тепловим насосом в залежності від застосовуваної температури

Типи теплових насосів мають значні переваги у оптимізації ресурсів, тому вони мають різні конфігурації [11, 13]:

- аеротермічний тепловий насос є одними з найбільш поширених у всьому світі, оскільки використовують енергію, що міститься в повітрі для своєї роботи, можуть бути типу повітря-повітря або повітря-вода, забезпечують гаряче або холодне повітря залежно від потреб температури приміщення, характеризуються легкою установкою та сумісністю з іншими вже встановленими системами нагрівання демонструючи високий рівень енергоефективності;

- геотермальний тепловий насос має первинний водяний контур, закопаний у одній або кількох свердловинах, які можуть перевищувати 100 м глибини, це обладнання з вищою ефективністю при стабільних температурах ґрунту, яке працює незалежно від зовнішніх температур. Геотермальні системи використовують природні характеристики землі для забезпечення тепла або холоду, де теплообмін відбувається всередині землі. Енергія, що надходить від сонячного випромінювання, опадів та інших атмосферних ефектів, щодня передається до і від поверхні землі.

Сушарка з повітряним тепловим насосом краща за багато інших методів сушіння, оскільки вона використовує менше енергії. Ефективність сушарок з повітряним тепловим насосом для сушіння сільськогосподарської продукції підвищується завдяки всім цим інноваційним конструкціям і система дає задовільні результати незалежно від сушеного продукту. Нещодавні дослідження гібридних сушарок на основі теплових насосів зосереджувалися на використанні теплових насосів у поєднанні з сонячною енергією для допомоги в процесі сушіння. Внаслідок цього виник великий інтерес до технологій

сонячно-інфрачервоних та сонячно-допоміжних сушарок на основі теплових насосів.

2. Сушка сировини за допомогою сонячних сушарок є відновлюваною альтернативою. Сонячні дегідратори – це обладнання в якому використовується сонячне випромінювання для підігріву повітря, одночасно видаляючи воду з тканин продуктів (фруктів, овочів, насіння та трав) та інших продуктів, таких як м'ясо. Після дегідrataції термін зберігання у сухому вигляді може коливатися від 6 місяців до двох років без втрати їхніх поживних, фізико-хімічних та органолептичних властивостей. Сонячні дегідратори складаються головним чином з колектора сонячної радіації, через який надходить повітря для дегідrataції та камери, де розміщуються продукти для сушіння. Енергія надходить від сонця у вигляді випромінювання, стіни колектора нагріваються через провідність [3, 7, 9, 17]. Свіже повітря, що входить, нагрівається і циркулює в сушильному відсіку за допомогою конвекційного процесу. Вода, що міститься в продуктах, випаровується і виходить через верхню частину сушильної зони. Нарешті, повітря насичене вологою повітря виходить через зону виходу сировини і розсіюється в навколишньому середовищі. Постійний процес конвекції призводить до висихання сировини протягом періодів, що залежать від кліматичних і мікрокліматичних умов дня та місця, де працює дегідратор.

Метою теплового збору сонячної енергії є зловити якомога більше тепла, що є процесом перетворення енергії сонячного випромінювання на тепло або теплову енергію. З метою правильного використання та максимальної користі від сонячної теплової енергії виникла потреба у винаході технологій, що сприяли цій діяльності, тому виникло створення сонячного колектора [12]. Сонячна енергія – це відновлювана енергія, яка отримується від сонця і з якою можна генерувати тепло та електрику, що здійснюється за допомогою різних колекторів, таких як фотогальванічні елементи, геліостати або теплові колектори, таким чином сонячна енергія може перетворюватися на теплову або електричну.

Існують два типи сонячних технологій: пасивні та активні, що залежить від того, як вони поглинають, перетворюють та розподіляють сонячну енергію. До активних технологій належать використання фотогальванічних панелей та теплових сонячних колекторів. На сьогодні найбільш розвиненим джерелом сонячної енергії є фотогальваніка [5]. Фотовольтаїчні системи поділяються на два типи: автономні системи та системи, підключені до мережі. Автономні системи використовуються в сільських районах, куди не доходить електромережа, тому необхідна система накопичення, оскільки вони виробляють енергію лише в сонячні години. Кількість панелей, які слід встановити, повинна розраховуватися з урахуванням енергетичного попиту в несприятливі місяці та умов орієнтації та нахилу. Системи підключені до мережі та працюють паралельно з електромережею, вони економічніші, оскільки не потребують батарейного блоку.

Сонячні колектори – це алюмінієва конструкція, що складається з сонячних елементів з кремнію у яких за допомогою фотоелектричного ефекту сонячне випромінювання перетворюється на електричну енергію. Сонячні

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

колектори відомі як теплообмінники низької, середньої та високої температури. Існують три основні типи теплових сонячних колекторів: плоскі колектори, вакуумні трубки та концентратори [17]. Хоча геометрично вони сильно відрізняються, проте їх основна мета однакова – перетворювати сонячне випромінювання в тепло для задоволення певної енергетичної потреби. Тепло, поглинуте сонячним колектором, може безпосередньо подаватися на споживання або зберігатися в контейнері через робоче тіло (рис. 1.3). Таким чином, корисна енергія, зібрана сонячним колектором є результатом енергетичного балансу між енергією сонячного випромінювання, що падає на колектор та енергією, що втрачається через передачу тепла шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Фотогальванічні панелі – це пристрої, робота яких базується на впливі сонячного світла на панель, де енергія передається електронам, які розділяються на нейтрони та протони, що дозволяє генерувати електрику. Фотогальванічна панель складається з набору фотогальванічних елементів, які виробляють електрику з сонячного світла через фотоелектричний ефект. Елементи утворені двома металевими діодами (одним позитивним і одним негативним), а між ними знаходяться дві кремнієві пластини (одна негативна, інша позитивна), розділені проміжною пластиною, яка дозволяє електричному потоку текти лише в одному напрямку [5, 6]. Фотони сонця збуджують проміжну пластину і це стимулює атоми позитивної пластини до вивільнення електронів. Останні проходять через негативну пластину і рухаються по електродах. Таким чином виникає напруга, яка за допомогою резистора створює струм.



Рисунок 1.3 – Сонячні колектори
а) вакуумний, б) параболічний, с) плоский

Теплові сонячні панелі є елементами, які відповідають за збір енергії, що міститься в сонячному випромінюванні та передачу цієї енергії у формі тепла повітрю, яке з ним контактує при цьому для їх встановлення потрібен нахил від 30 до 45 градусів, що застосовується до систем з плоскою панеллю, які є

поглиначами з більшою міцністю, ніж у вакуумних трубок, які дуже крихкі. Тому колектори групуються на 3 групи [5, 12]:

- колектор низької температури або незахищений плоский сонячний колектор. Досягає максимальної температури до 50°C;

- колектор середньої температури – ці колектори, по суті, такі ж, як попередні, але мають прозоре покриття, що запобігає втраті тепла панеллю, яка може досягати до 90°C;

- колектор високої температури – це елементи, де додається ще одне покриття між попереднім і перетворювачем, утворюючи вакуум між двома покриттями, так що температура може досягати до 150°C.

Принцип роботи плоского колектора базується на відомому парниковому ефекті. Більшість сонячного випромінювання проходить крізь зовнішнє покриття і затримується всередині колектора (парниковий ефект). Це випромінювання поглинається абсорбуючою пластиною, підвищуючи її температуру, через що пластина починає віддавати тепло спіральній трубній системі, яка припаяна або вбудована в неї. Поступово, рідина, що циркулює всередині, температура трубчастого змійовика підвищується до досягнення робочої температури колектора [12, 17]. Плоскі сонячні колектори є найбільш поширеними. Основні компоненти плоского колектора: покриття, яке може бути виготовлене з одного або двох аркушів скла чи іншого матеріалу, що пропускає радіацію; поглиначна пластина з різних матеріалів, таких як сталь, латунь, алюміній, мідь або інший; труби, які передають тепло, поглинуте рідиною за допомогою іншого провідного елемента, зазвичай міді; труби для захоплення та відкачування рідини (колектори або горизонтальні труби); ізоляція, що використовується для мінімізації теплових втрат знизу та по боках корпусу колектора; і контейнер або коробка, яка служить корпусом для інших вищезазначених частин і виконує функцію збереження максимально захопленого тепла.

Коли сонячне випромінювання проходить через прозоре покриття та потрапляє на поверхню з високою поглинальною здатністю, велика частина енергії поглинається пластиною і передається транспортній рідині всередині труби, яка спрямовується до теплового бака для зберігання або до місця використання. Нижня частина та боки основи ізольовані для зменшення втрат через теплопровідність/конвекцію. Труби, через які циркулює рідина, з'єднані з обох кінців з колекторами, які зазвичай мають більший діаметр, ніж труби, що приймають сонячне випромінювання [3, 9, 17]. У сонячному колекторі відбувається фізичний ефект природної циркуляції або термосифону, що дозволяє переміщати рідину з точки збору тепла в менш теплу точку зберігання. Це починається всередині труб сонячного колектора, якими циркулює рідина (зазвичай вода), яка під дією сонячного випромінювання підвищує свою температуру і спричиняє зміну щільності рідини, що призводить до її переміщення на верхню частину труб колектора та напрямку до резервуара для зберігання, який завжди знаходиться у верхній частині системи колектора. У резервуарі при цьому холодна вода рухається з дна до колектора, створюючи повний безперервний цикл природним способом; тому ефект термосифону

відомий як природна циркуляція.

Варіантом звичайного плоского колектора є так званий плоский колектор надвисокого вакууму, який завдяки вищій робочій температурі відноситься до групи сонячних колекторів середньої температури. Сонячний колектор перетворює падаючу сонячну енергію на інший вид корисної енергії. Він не має звичайного теплообмінника у якому відбувається теплообмін між рідинами з високими коефіцієнтами теплопередачі. У колекторах плоскої пластини поверхня, що поглинає сонячне випромінювання, дорівнює поверхні, яка його поглинає. Можна проектувати плоскі колектори для роботи з температурами поглинаючої пластини в межах від 40°C до 130°C. Колектори використовують як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання, не потребують систем слідування за сонцем і практично не потребують обслуговування [3, 8, 12]. Гібридні сонячні панелі (фотогальванічних + теплові) – це результат поєднання фотогальванічних панелей і теплових панелей, що дозволяє одночасно виробляти електроенергію та тепло, для генерації електрики та гарячої води за допомогою однієї установки. Термодинамічні сонячні панелі є альтернативою звичайним сонячним панелям, відрізняючись тим, що вони не лише захоплюють сонячну енергію, а й енергію зовнішнього середовища, що походить від тепла сонця, води, дощу, а також вітру, які виникають завдяки термодинамічним принципам панелі, за умови, що зовнішня температура не опускається нижче абсолютного нуля.

Вакуумні трубчасті колектори мають кращу ефективність і забезпечують вищі температури, ніж плоскі колектори, здатні досягати робочих температур понад 70°C. Тому найпоширенішим застосуванням цього типу колекторів є нагрівання води для систем опалення із традиційними радіаторами та систем охолодження за допомогою абсорбційних машин. Основними недоліками цих колекторів у порівнянні з плоскими колекторами є їх висока ціна, більша трудомісткість і необхідна обережність при монтажі та менша міцність [12]. Колектори складаються з 10–20 скляних трубок у яких створено вакуум. Усередині кожної трубки є мідна трубка, приварена до прямокутної пластини, яка поглинає сонячне випромінювання і передає тепло рідині, що циркулює по трубці. Як і колектори з плоскою пластиною, робота цього типу колекторів базується на ефекті парникового газу, що виникає, коли сонячне випромінювання проходить через скло. Різниця в тому, що в цьому випадку не потрібен ізолюючий матеріал, оскільки сам вакуум трубок майже повністю усуває тепловтрати назовні через скло. Тому їхня ефективність завжди вища, ніж у колекторів з плоскою пластиною, особливо за умов низької сонячної радіації або низької температури навколишнього середовища, хоча їхня вартість є вищою.

Сонячні батареї призначені для накопичення електричної енергії, виробленої сонячними фотогальванічними панелями, щоб можна було її використовувати вночі або в похмурі дні. Батареї виконують функцію забезпечення електричною енергією систему в момент, коли фотогальванічні панелі не виробляють необхідну електроенергію [5, 6]. Наприклад, уночі або в періоди низької освітленості. Вони слугують для зберігання електричної

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

енергії, виробленої сонячними панелями для її подальшого використання. Акумулятори класифікуються за типом технології виготовлення, а також за використаними електролітами. Найбільш використовуваними є гелеві акумулятори, через те, що вони мають довгий і тривалий термін служби. Тому вони найбільш підходять для установок, де потрібна тривала і довготривала робота акумуляторів.

Функція інвертора полягає в тому, щоб перетворювати вхідну постійну напругу від сонячних панелей на симетричну вихідну змінну напругу з величиною та частотою, яка бажана користувачем. Конкретно інвертори призначені для ізолюваних установок, без підключення до мережі, і забезпечують електроенергію змінного струму з напругою та частотою на яких зазвичай працюють електричні та електронні прилади [5, 6]. Перетворює постійну напругу в змінну за допомогою електронних пристроїв, які дозволяють переривати та змінювати її полярність. Для ізолюваних систем вони повинні бути автокомутуваними, оскільки не використовують енергію зовнішнього джерела. Рекомендується використовувати інвертор, який генерує чисту синусоїдну хвилю, яка схожа на мережеву.

При розміщенні скла між пластиною, що поглинає тепло і Сонцем відбувається явище, зване «парниковим ефектом». Воно полягає у захопленні сонячних променів або сонячної радіації, перешкоджаючи тому, щоб енергія, що проходить через скло, виходила назовні, створюючи енергетичну пастку для випромінювання. Цей ефект такий самий, як той, який забезпечує атмосфера стосовно Сонця і Землі. Якщо процес проаналізувати детальніше, можна спостерігати, що коли сонячна радіація потрапляє на сонячний колектор, вона може бути поглинена повністю або частково, частина також може бути відбитою, а інша пройти через тіло. Енергія, що поглинається, це та, яка нагріває тіло і, в свою чергу, випромінює радіацію з довжиною хвилі, що залежатиме від його температури [11]. Основна частина сонячного випромінювання знаходиться в межах від 0,3 до 2,4 мкм. Скло, будучи прозорим, пропускає через себе електромагнітне випромінювання, однак невелика частина його відбиватиметься на його поверхні, що буде залежати від товщини скла. Після проходження крізь скло випромінювання досягає поглинача, який розігрівается і також випромінює випромінювання, що коливається між 4,5 і 7,2 мкм. На цій довжині хвилі скло непрозоре для цього випромінювання, підвищуючи температуру всередині сонячного колектора.

Діаграма компонентів системи сушіння за допомогою відновлювальних джерел енергії (рис. 1.4). Радіація є стохастичним явищем, зміна потоку сонячної радіації залежно від часу доби та явищ, а недостатність сонячної радіації компенсується батареєю.

Робота системи сушіння рослинної сировини:

– сонячне випромінювання падає на фотогальванічні модулі, які, у свою чергу відповідають за пряме перетворення енергії сонячного випромінювання в електрику у вигляді постійного струму;

– інвертор або перетворювач відповідає за перетворення напруги постійного струму від сонячних панелей до симетричної вихідної напруги

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінного струму з потрібною величиною та частотою;

- інвертор або перетворювач відповідає за перетворення напруги постійного струму від сонячних панелей до симетричної вихідної напруги змінного струму з потрібною величиною та частотою;

- сушильна камера складається з лотків, де зберігається сировина, що потрібно сушити, а циркуляційне повітря всередині камери проходить через лотки, що дозволяє висушити продукт;

- повітря, яке витягнуло вологу з рослинної сировини викидається з камери сушіння через вихідний отвір;

- акумулятори відповідають за стабільність електричного потоку під час роботи сушарки. Адже можуть бути моменти тіні, що допомагає підтримувати температуру сушіння постійною.

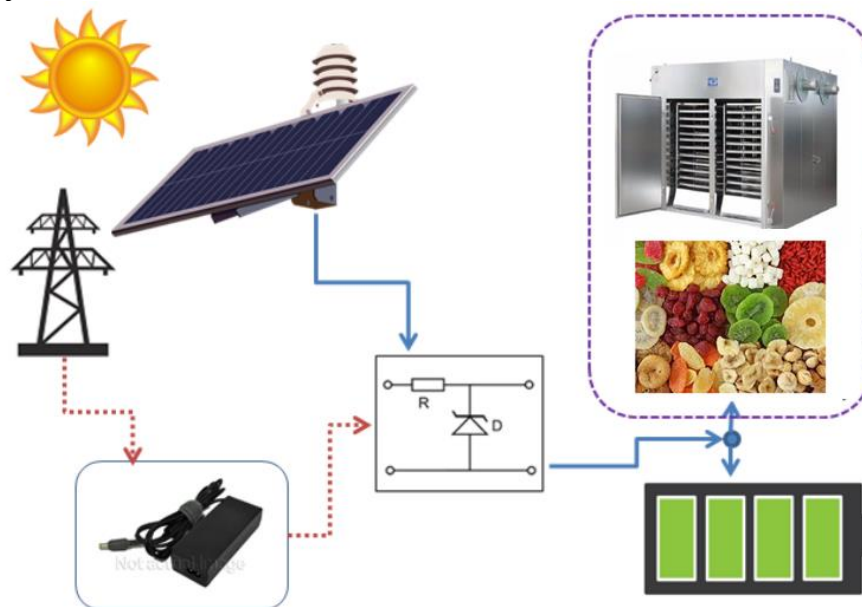


Рисунок 1.4 – Сушіння рослинної сировини за допомогою відновлюваних джерел енергії

Сонячні сушарки мають такі основні частини [24]:

- сушильна камера, де розміщують матеріали для проведення процесу сушіння;

- колектор для перетворення сонячного випромінювання на тепло;

- обладнання для передачі тепла, щоб передавати тепло повітря для сушіння або матеріалу;

- засоби для підтримання потоку повітря для сушіння.

Керування та контроль сонячних сушарок мають на меті забезпечити економічну роботу сушарки на кожному етапі процесу сушіння, враховуючи реальний стан матеріалу під час сушіння, а також реальні метеорологічні умови. Використання сонячної енергії для сушіння – це не просто метод для того, щоб зекономити традиційні енергетичні компанії, а технологія для виробництва сухих матеріалів високої якості. Керування включає дії, які необхідні для здійснення належного процесу сушіння та визначення і виконання необхідних взаємодій шляхом застосування стратегії керування.

Перша фаза сушіння – це подача свіжого матеріалу у сушарку, бо відповідна якість свіжого матеріалу є попередньою умовою хорошої якості сухого продукту. Основні дії з керування процесом сушіння [24]:

- подача свіжого матеріалу у сушарку;
- перемішування або розподіл шару матеріалу під час сушіння;
- регулювання швидкості потоку повітря;
- регулювання рециркуляції повітря;
- регулювання процесу переривчастого сушіння (визначення початку і інтервалу перерви);
- відокремлення сонячної сушарки від атмосфери вночі та під час дощу, коли немає джерела допоміжної енергії;
- регулювання роботи джерела допоміжної енергії;
- розподіл зібраної сонячної енергії всередині сушильного простору;
- визначення режиму роботи у випадку сонячних сушарок;
- визначення відповідної температури повітря для сушки на вході на різних етапах процесу сушіння.

Дії контролю за операцією сушіння стосуються того, що вона має задані значення деяких робочих параметрів, визначених стратегією управління. Основні дії контролю такі: контроль температури робочих середовищ; контроль відносної вологості; контроль масового потоку середовищ, що рухаються; контроль теплового навантаження системи; контроль швидкості сушіння; контроль рециркуляції.

Коли об'єкт піддається впливу сонячного випромінювання, його температура підвищується до тих пір, поки теплові втрати не зрівняються з надходженням тепла. Втрати залежать від випромінювання матеріалу, що нагрівається, руху холодного повітря, що його оточує та теплопровідності об'єктів, що контактують з ним.

3. Сушарка з тепловим насосом із сонячною підтримкою. Ефективність сушарок із тепловим насосом з сонячною підтримкою для сушіння рослинної сировини була продемонстрована численними дослідженнями у всьому світі, що призвело до зростання зацікавленості до таких сушарок. Було виявлено, що сушарки з тепловим насосом і сонячною підтримкою ефективні у скороченні часу сушіння та споживання енергії. Результати показали, що запропонована сушарка працювала ефективно, коефіцієнт економії енергії може досягати 37,96%. Порівняно з традиційною сушаркою з тепловим насосом, запропонована сушарка показала хороші результати у зменшенні споживання енергії та часу сушіння на 40% [28]. Було виявлено, що споживання електроенергії було нижчим у порівнянні з використанням лише теплового насоса. Споживання електроенергії під час літнього процесу сушіння було на 9,1 кВт·год менше, ніж під час осіннього. Крім того, температура сушильної камери та коефіцієнт ефективності були значно впливовими від інтенсивності сонячного випромінювання.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння – це процес видалення води, що міститься у рослинній сировині з метою збільшення його збереженості та стабільності, зменшення ваги та об'єму, а також концентрації

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

смаку та поживних речовин. Сушіння продуктів харчування вважається відмінним варіантом для обробки та збереження харчових продуктів відповідно до стандартів якості та норм, водночас зменшуючи споживання традиційного палива, покращуючи якість продуктів і дбаючи про навколишнє середовище. Ця інтенсивна операція потребує енергії, яка споживає від 9 до 25%. Тому, щоб зменшити споживання енергії, спожиту на одиницю вологи продукту, необхідно розглянути різні методи сушіння, а також різне обладнання для сушіння залежно від конкретної операції та мети процесу сушіння продуктів.

Зазначено, що традиційні джерела енергії, насамперед викопне паливо та електроенергія з мережі тривалий час були домінуючими джерелами енергії на підприємствах харчової промисловості. Проте традиційні джерела енергії, що використовуються у переробці харчових продуктів, мають значні екологічні наслідки, включаючи викиди парникових газів. Тому є необхідність в застосуванні відновлювальних джерел енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії у підприємства харчової промисловості пропонує безліч переваг, що охоплюють економічні та екологічні аспекти, що призводить до суттєвих екологічних переваг шляхом зменшення викидів парникових газів. Використання чистих джерел енергії сприяє зниженню викидів вуглецю, допомагаючи підприємствам харчової промисловості відповідати цілям сталого розвитку та нормативним вимогам.

Тому актуальним вважається застосування у процесі сушіння таких технологія, як сушіння за допомогою теплового насоса. У сушінні за допомогою теплового насоса є відчутна перевага серед інших сушарок для продуктів: тепловий насос має здатність відновлювати приховане та відчутне тепло шляхом конденсації вологи з повітря для сушіння, чого не можуть робити інші методи сушіння. Тепло, що генерується, повторно циркулює назад у сушарку шляхом нагрівання зневодненого повітря для сушіння. Таким чином, енергоефективність значно зростає в результаті відновлення циркулюючого тепла, яке інакше було б втрачено в атмосферу при використанні інших традиційних сушарок. Це дозволяє здійснювати сушіння при нижчих температурах, що призводить до того, що деякі продукти не змінюють свої фізичні властивості, також ця система представляє менші експлуатаційні витрати, навіть коли умови навколишнього середовища більш вологі.

Сушіння сировини за допомогою сонячних сушарок є відновлюваною альтернативою. Сонячна енергія – це відновлювана енергія, яка отримується від сонця і з якою можна генерувати тепло та електрику, що здійснюється за допомогою різних колекторів, таких як фотогальванічні елементи, геліостати або теплові колектори, таким чином сонячна енергія може перетворюватися на теплову або електричну. Сонячні сушарки працюють шляхом захоплення сонячної енергії через сонячні панелі або пристрої для рекуперації тепла, які нагрівають повітря, що використовується для сушіння продуктів. Сонячні сушарки можуть бути різних типів, наприклад, сушарки на лотках або тунельні сушарки. Важливою перевагою сонячної сушарки є те, що вона не викидає парникові гази і не виробляє токсичних відходів, що робить її більш екологічною та сталою, ніж звичайні сушарки.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНВЕКЦІЙНОЇ СУШАРКИ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

2.1 Обґрунтування основних компонентів теплового насоса

Охолоджувальний цикл використовує рідину, яка називається холодоагентом для передачі тепла з одного місця в інше в цих циклах. Рідина поглинає тепло, коли вони переходять з рідини в газ, тоді як гази виділяють тепло, коли вони переходять з газу в рідину. Елементи, що складають класичний охолоджувальний цикл: конденсатор, випарник, компресор і розширювальний клапан. На першому етапі відбувається подача холодоагенту, на цьому етапі охолоджувальна рідина знаходиться у стані насиченої рідини-пару. Після цього вона переходить на другий через випарник, який перетворює рідину на насичену пару (при її випаровуванні). Потім холодоагент потрапляє через ізентропічний канал, через який проходить до компресору, саме тут підвищується тиск і температура речовини, що перетворюється на насичену пару [10, 11, 18, 21]. На третьому етапі речовина знаходиться під дуже високим тиском і температурою, а на четвертому етапі вона проходить через конденсатор, де температура рідини різко знижується і вона переходить у насичену рідину, проходячи через дросельний клапан, який встановлює для рідини необхідну температуру та тиск і цикл починається знову.

У цьому процесі можна використовувати різні інструменти контролю потоку холодоагенту, який контролює подачу рідкого холодоагенту на вхід випарника. Коли холодоагент проходить через випарник, відбувається поглинання тепла, що змушує холодоагент випаровуватися. Затискний клапан відповідає за регулювання проходження рідини через випарник [10, 11]. Коли холодоагент виходить з випарника в напівгазоподібному стані він проходить через всмоктуючу лінію, яка під'єднана до компресора. Компресор отримує холодоагент під низьким тиском і стискає його, збільшуючи тиск і температуру газу, після чого останній спрямовується до конденсатора, де відбувається процес охолодження цього газу під високим тиском, що спричиняє його конденсацію.

Цикл роботи теплового насоса дуже схожий на цикл охолодження. Компресор переносить тепло, яке поглинуте у випарнику і направляє його до конденсатора, після чого з'єднується з конденсатором і регулюється за допомогою розширювальних клапанів. Водночас тепло, яке поглинається у випарнику, охолоджує вміст насоса до холодного теплового навантаження. При сушінні харчових продуктів необхідно сушити їх при низьких температурах (від 30 до 50°C) і контролювати відносну вологість [10, 11, 21]. Сушіння при дуже високих температурах фізично та хімічно погіршує сировину і водночас

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Корінь</i>				Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						25	14
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>							

впливає на структуру матеріалу та може зробити його непридатним для подальшого використання. Проте сушіння при низьких температурах значно знижує втрату поживних речовин та мінімізує шкоду фізичним властивостям продуктів. З огляду на вищезазначене, сушіння за допомогою теплового насоса є найкращим варіантом порівняно з іншими сушарками.

Основні компоненти теплового насоса:

1. Компресор є механізмом об'ємного стиснення або поступового зменшення об'єму, який забезпечує циркуляцію холодоагенту всередині контуру. На цьому етапі холодоагент входить до компресора у вигляді газу під низьким тиском і виходить як газ під високим тиском. Компресор вважається найважливішим елементом обладнання, бо його функція полягає у збільшенні тиску холодоагенту, що знаходиться у газоподібному стані, який надходить з випарника і направляє його до тиску, що перетворює газ на рідину. Компресори залежно від їхнього розташування можуть бути герметичними, напівгерметичними або відкритими [10, 11, 18]. Він отримує холодоагент, що виходить із випарника, де пара знаходиться під низьким тиском і температурою витісняючи його по випускному трубопроводу до конденсатора. Стиснення будь-якого газу вимагає механічної енергії, що представляє собою енергетичне споживання. Функція компресора в циклі охолодження полягає в постійному відборі пари холодоагенту з випарника, щоб у випарнику можна було підтримувати низький тиск і низьку температуру, де холодоагент може кипіти, відбираючи тепло з охолоджуваного простору. Потім компресор повинен підняти тиск холодоагенту до рівня при якому він може конденсуватися, віддаючи тепло в охолоджувач-конденсатор.

Компресори зазвичай поділяються на три основні типи: динамічні з позитивним зміщенням та теплові. Типи з позитивним зміщенням поділяються на дві основні категорії: поршневі та ротаційні. Поршковий компресор складається з одного або декількох циліндрів кожен з яких має поршень, що рухається вперед і назад, переміщуючи певний об'єм газу з кожним ходом. Поршковий компресор, де повітря всмоктується всередину циліндра завдяки дії поршня, який приводиться в рух шатуном і колінчастим валом. Поршень, здійснюючи зворотний рух, стискає повітря всередині зазначеного циліндра, вивільняючи його для наступного етапу після досягнення необхідного тиску. Поршкові компресори можуть бути мастильними або безмасляними [10, 11, 18]. У безмасляних компресорів камера всмоктування та стиснення ізольована від будь-якого контакту з мастилом компресора, працює в сухому режимі та запобігає забрудненню стисненого повітря мастилом обладнання. Герметичні компресори знаходяться всередині корпусу, а електродвигун у всіх моделях охолоджується газами зі всмоктування. Корпус наповнюється цими газами, які потім спрямовуються до циліндрів, стискаються та викидаються з компресора назовні до конденсатора. Ротаційні компресори бувають типів лопаткових, гвинтових, турбінних і з рідинним кільцем, кожен з яких має корпус з одним або кількома обертовими елементами, що взаємодіють між собою, як лопаті чи гвинти, або переміщують фіксований об'єм при кожному оберті.

Вибір типу компресора, будь то осьовий, відцентровий, поршковий або

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ротаційний, залежить головним чином від необхідного для стиснення потоку, густини газу разом із загальною висотою та того, що потрібно виконати.

Розрахунок масового потоку системи [18]

$$\dot{m}_h = \dot{V} \cdot \rho$$

$$\dot{m}_h = 0,00427 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 30,91 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{m}_h = 0,131 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Для визначення значення ентальпії на виході з компресора буде використано дані про масовий потік, що циркулює трубопроводом системи, який становить 10,209 кг/с, а також значення ентальпії на вході в компресор, яке дорівнює 440,1 кДж/кг [18]

$$h_{2a} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} + h_1$$

$$h_{2a} = \frac{3,546 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0,131 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} + 440,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2a} = 467,168 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Для розрахунку ККД компресора скористаємося даними ентальпії на вході в компресор, що становить 440,1 кДж/кг, а також на виході з компресора, які становлять 467,168 та 466,1 кДж/кг відповідно [18]

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta = \frac{466,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 440,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{467,168 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 440,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\eta = 0,9605$$

Обрано спіральний компресор, який використовує механізм орбітального руху для стиснення газу. На відміну від поршневих компресорів, які використовують поршень, що рухається вгору і вниз у циліндрі для стиснення газу, компресори з прокруткою використовують дві спіралі, які рухаються разом для стиснення газу в закритій камері. Компресори такого типу мають дві

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спіралі: одну нерухому, іншу рухому. Рухома спіраль обертається круговим рухом у верхній частині фіксованої спіралі, створюючи герметичну зону стиснення в центрі. Під час обертання рухомої спіралі простір між двома спіралями зменшується, що стискає газ, затримуваний у зоні стиснення. Під час стиснення газ вивільняється на виході компресора і надходить у систему, яка його потребує (рис. 2.1). Однією з головних переваг спіральних компресорів є їхня енергоефективність. Оскільки клапани чи поршні, які рухаються всередині камери компресії, компресори мають менше внутрішніх протікань і втрат енергії, що означає, що вони потребують менше енергії для роботи, що знижує енергетичні витрати та вуглецевий слід [14, 15]. Мають меншу кількість рухомих частин, ніж у поршневих компресорів, менше зношення і менше механічних проблем загалом, що означає, що компресори з прокруткою мають довший термін служби та нижчі витрати на обслуговування. Конструкція компресора є повністю герметичною, тобто вона поміщена в корпус, а оболонка компресора – це циліндрична зварна сталева оболонка. Спіральний компресор переважно використовується в холодильній системі.

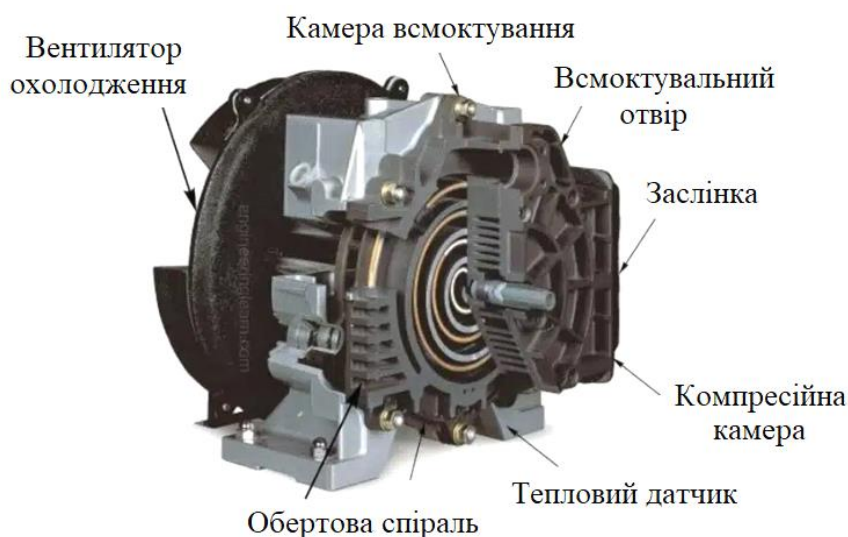


Рисунок 2.1 – Спіральний компресор

2. Конденсатор є теплообмінником, аналогічним випарнику, який дозволяє обмінюватися енергією між зовнішнім повітрям, примусово проштовхуваним за допомогою вентиляторів. На цьому етапі холодоагент потрапляє у вигляді газу та конденсується в рідину, яка віддає своє тепло зовнішньому повітрю. Конденсатор – охолоджувач, який знаходиться у вигляді дуже гарячого газу, що конденсується переходячи в рідкий стан. Тепло передається зовнішньому середовищу або через тепловий насос або через осушувач. Конденсатор у тепловому насосі відповідає за виведення тепла, поглинутого тепловим насосом у бажане середовище, залежно від режиму роботи, що пов'язано з тим, що одна з переваг теплового насоса полягає в тому, що це єдина система для обігріву та охолодження. Отже, у режимі нагрівання конденсатор спрямовує поглинане тепло до сировини, а в режимі охолодження – у зовнішнє середовище. Конденсатор розташований зовні теплового насоса.

Визначення масового потоку. Для аналізу конденсатора необхідно враховувати вихідні характеристики попередньо розрахованого компресора, а також ентальпію на виході конденсатора, що знаходиться у рідкому стані, що становить 265,4 кДж/кг [18]

$$\dot{m}_c = \dot{V} \cdot \rho$$

$$\dot{m}_c = 1,359 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,218 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{m}_c = 1,655 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Розрахунок теплового потоку між рідинами. Щоб визначити значення теплового потоку між рідинами, буде використано дані про ентальпію холодоагенту на вході та виході конденсатора, що становлять відповідно 467,168 та 265,4 кДж/кг

$$q_H = \dot{m}_h (h_{h.i} - h_{h.o})$$

$$q_H = 0,131 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(467,168 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 265,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$q_H = 26,431 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Температура, що входить у камеру сушіння [18]

$$q_H = \dot{m}_c C_{p.c} (T_{c.o} - T_{c.i})$$

$$T_{c.o} = 293,15 \text{ K} + \frac{26,431 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{1,655 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}$$

$$T_{c.o} = 309,001 \text{ K}$$

У конденсаторі здійснюється співвідношення потоків теплових потужностей

$$\dot{m}_h \cdot C_{p.h} = 0,131 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,225 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\dot{m}_h \cdot C_{p.h} = 0,16 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

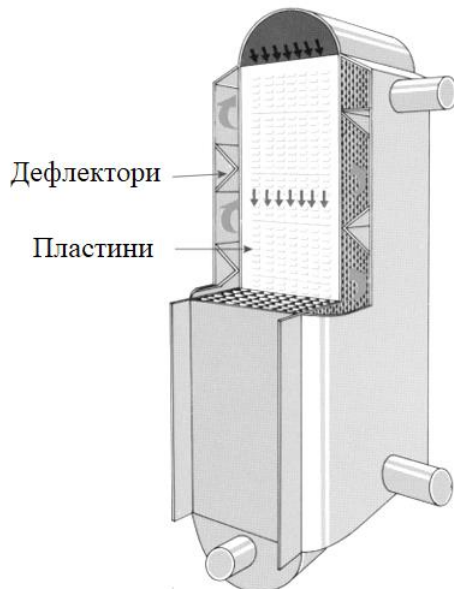
$$\dot{m}_c \cdot C_{p.c} = 1,665 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\dot{m}_h \cdot C_{p,h} = 1,676 \frac{kW}{K}$$

$$C = \frac{(\dot{m} \cdot C_p)_{min}}{(\dot{m} \cdot C_p)_{max}}$$

$$C = 0,0954$$



Конденсатор теплового насоса є невід'ємною частиною теплового насоса, оскільки допомагає подавати нагріте повітря у внутрішні приміщення, коли потрібне нагрівання або виводити тепло з сировини [19, 20]. В режимі нагрівання конденсатор спрямовує поглинане тепло до сировини, а в режимі охолодження – у зовнішнє середовище. Зварний пластинчастий теплообмінник представлено на рисунку 2.2.

Рисунок 2.2 – Зварний пластинчастий теплообмінник

3. Випарник є елементом теплообмінника, який дозволяє обмінювати енергію шляхом теплопровідності між холодоагентом, що змінює свій стан з рідини на газ при низькому тиску. Випарник – це компонент, куди надходить холодоагент у рідкому стані при низькому тиску та низькій температурі шляхом поглинання тепла з навколишнього середовища, де відбувається випаровування рідкого холодоагенту [10, 11, 20]. Випарник можна вважати обладнанням, яке забезпечує обмін теплом між двома рідинами з різними температурними точками, запобігаючи їх змішуванню між собою. На практиці теплообмінники широко використовуються в промисловості, бо вони дозволяють здійснювати великі обміни, такі як виробництво енергії.

Розрахунок теплового потоку між рідинами. Для визначення значення теплового потоку між рідинами, скористуємося даними про тепловий потік між рідинами в конденсаторі, а також потужність, яку передає компресор [18]

$$q_L = q_H - W$$

$$q_L = 26,431 \frac{kJ}{s} - 3,546 \frac{kJ}{s}$$

$$q_L = 22,885 \frac{kJ}{s}$$

$$q_L = q_H - W$$

$$q_L = 26,431 \frac{kJ}{s} - 3,546 \frac{kJ}{s}$$

$$q_L = 22,885 \frac{kJ}{s}$$

Температура, що входить у камеру охолодження [18]

$$q_L = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,i} - T_{c,o})$$

$$T_{c,o} = 293,15 \text{ K} - \frac{22,885 \frac{kJ}{s}}{1,655 \frac{kg}{s} \cdot 1,007 \frac{kJ}{kg \cdot K}}$$

$$T_{c,o} = 279.418 \text{ K}$$

У випарнику здійснюється співвідношення потоків теплових потужностей

$$\dot{m}_h \cdot C_{p,h} = 1,665 \frac{kg}{s} \cdot 1,007 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\dot{m}_h \cdot C_{p,h} = 1,676 \frac{kW}{K}$$

$$\dot{m}_c \cdot C_{p,c} = 0,131 \frac{kg}{s} \cdot 1,534 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\dot{m}_h \cdot C_{p,h} = 0,20 \frac{kW}{K}$$

$$C = \frac{(\dot{m} \cdot C_p)_{min}}{(\dot{m} \cdot C_p)_{max}}$$

$$C = 0,119$$

3. Клапан розширення є механізмом, який дозволяє зменшити тиск рідкого холодоагенту, що надходить з конденсатора, без будь-якого обміну енергією. Він використовує теорему Бернуллі, відповідно до якої через обмеження швидкість потоку значно збільшується, що призводить до зниження тиску з відносним зменшенням температури. Розширювальний клапан контролює та дозує подачу охолоджувача до випаровувача за умов оптимальної температури та тиску, так щоб він використовувався повністю [10, 11]. У випадку теплових насосів розширювальний клапан змінює напрямок холодильного циклу так, що теплообмінник, який в циклі працює як випарник,

починає функціонувати як конденсатор, а теплообмінник, що виконує роль конденсатора, може працювати як випарник, що дозволяє тепловим насосам мати спеціальну функцію для зміни режиму роботи в одному і тому ж обладнанні, а саме забезпечення нагрівання або охолодження просто активуючи бажаний цикл.

Компоненти теплового насосу включають спіральний компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Потік повітря всередині камери сушіння циркулює через випарник та конденсатор. Вентилятор забезпечує можливість циркуляції повітряного потоку. За допомогою вентилятора повітря циркулює всередині сушарки. Вентилятори є найпоширенішими машинами для створення руху повітря в промисловості, бо їх робота базується на передачі механічної енергії повітрю через ротор, який обертається на високій швидкості і підвищує кінетичну енергію потоку, яка потім частково перетворюється на статичний тиск. Вони поділяються на дві великі групи: осьові та відцентрові вентилятори. Повітря проходить через нагрівник (конденсатор холодильного циклу). Гаряче повітря потрапляє всередину сушарки вбираючи вологу з продукту для сушіння. Після цього повітря стає гарячим і вологим, оскільки містить водяну пару, яку воно випарувало та поглинуло із сировини, що висушується. Надалі повітря потрапляє у випарник (холодильного циклу), де охолоджується. Водяна пара конденсується і повітря висихає, холодне й сухе повітря виходить із випарника. Повітря знову повертається до конденсатора (холодильного циклу), де нагрівається, таким чином його повторно використовують і цикл відновлюється.

Вентилятори – це турбомашини, здатні переміщувати певну масу повітря, передаючи йому певний тиск, достатній, щоб подолати втрати напору, які виникають при циркуляції по каналах. Вентилятори складаються з обертового елемента та двигун. Обертальний елемент – це частина вентилятора, яка обертається навколо його осі, може бути гвинтом або робочим колесом. Його називають гвинтом, якщо напрямок виходу повітря, що нагнітається, паралельний осі вентилятора (осьовий напрям) [10, 11]. У центробіжних вентиляторах шлях повітря слідує осьовому напрямку на вході та паралельному радіальній площині на виході. Вхід і вихід розташовані під прямим кутом, а ротор складається з лопатей, які можуть бути передніми, радіальними або задніми. В осьових вентиляторах вхід і вихід повітря в пристрій сліднують траєкторії по коаксіальних циліндричних поверхнях.

Мета теплового насоса – підтримувати сировину, що нагрівається при високій температурі, що досягається шляхом поглинання тепла з джерела із низькою температурою. Основними елементами, що складають тепловий насос є: компресор, конденсатор, розширювальний вентиль та випарник. Потік повітря для сушіння сировини проходить через сушильну камеру в і збирає вологу із продукту. Повітря, насичене вологою направляється до випарної спіралі. Існує два типи систем випарників. Один із них – це спіраль прямого розширення, через яку холодоагент піддається фазовому переходу з рідини в пару для охолодження та осушення повітря. Інший – це система з охолодженою

водою, у якій потік охолодженої води до спіралі регулюється для охолодження та осушення. Під час процесу осушення повітря спершу суттєво охолоджується до точки роси. Іншим результатом охолодження є конденсація води з повітря. Латентне тепло випаровування поглинається випарником для накопичення холодоагенту, а відновлене тепло перекачується до конденсатора. Кількість енергії, споживаної для роботи компресора, зазвичай невелика порівняно з енергією, виділеною конденсатором, і, відповідно, отриманою середовищем, яке необхідно нагріти.

2.2 Структурна схема процесу сушіння з тепловим насосом

Сушарки з тепловим насосом є енергетично замкненими, практично герметичними і, на відміну від звичайних сушильних пристроїв, виштовхують воду з системи у рідкому вигляді, утримуючи її поза системою, змушуючи циркулювати лише дедалі сухіше гаряче повітря, цю воду, яка виштовхується, можна зберігати у резервуарі і вона придатна для використання. З іншого боку, дегідратори з тепловим насосом стають складними системами через взаємозалежність їхніх компонентів та параметрів. Основні переваги систем сушіння з використанням теплових насосів наступні [10]:

- контроль відносної вологості повітря для сушіння та контроль температур сухого та вологого термометра;
- дозволяє досягти високої енергоефективності через низьку температуру дегідrataції;
- у кінці процесу отримується високоякісний продукт;
- зменшує витрати енергії, що робить його більш екологічною системою.

У порівнянні з конвективними сушарками гарячого повітря, сушарки з тепловим насосом виконують свою роботу в закритому циклі, що дозволяє повторно використовувати повітря та частину тепла, що використовується в системі, що дозволяє мати високу енергоефективність та зручність експлуатації. Повітря нагрівається конденсатором теплового насоса і подається в сушильну камеру, і коли воно виходить з неї, повітря ще гаряче і вологе. Далі повітря проходить через випарник (холодильного циклу), який видаляє вологу шляхом конденсації при контакті з низькою температурою випарника, а конденсована вода падає в резервуар. Потім сухе та свіже повітря знову направляється до конденсатора для нагрівання та початку циклу. Крім того, енергоефективність цих сушарок краща через те, що для роботи вони потребують менше енергії.

Головним завданням теплового насосу є переміщення теплової енергії в напрямку протилежному природному, тобто від більш холодного місця до більш гарячого за допомогою застосування зовнішньої роботи. Робота теплових насосів здійснюється за умов сталого стану та специфічного термодинамічного циклу. Теплові насоси використовують випаровувальну та конденсаційну летку рідину, звану холодильним агентом, яка циркулює через цикл випаровування та конденсації. Найважливішою перевагою теплових насосів є економія енергії, оскільки тепловий насос отримує 75% енергії з навколишнього середовища і

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лише 25% електроенергії для генерації необхідного тепла [10, 11, 18, 26-27]. Передача тепла здійснюється через просторову різницю температур, водночас тепло можна визначити як форму енергії, що передається між матеріальними тілами або з однієї системи в іншу, за умови наявності різниці температур між ними. Передача енергії у вигляді тепла пов'язана з обміном між гарячим і холодним тілом, які можна назвати джерелом і приймачем. Передача тепла відбувається, коли обидва середовища досягають подібної температури. Теплопередача – енергія, яка передається в русі внаслідок різниці температур у тілі або між різними тілами. Тепло передається трьома різними способами: шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Теплопровідність є механізмом передачі тепла на атомному рівні через матерію за допомогою молекулярної активності, шляхом зіткнення одних молекул з іншими, де більш енергетичні частинки передають енергію тим, хто має менше енергії, виникає потік тепла від вищих температур до нижчих. Теплопередача відбувається, коли два тіла перебувають при різних температурах і обидва контактують фізично. Процес є єдиним механізмом теплопередачі, який відбувається всередині непрозорих твердих тіл. Таким чином, проведення може мати місце у твердих тілах, рідинах або газах [11, 18]. Процес теплопередачі відбувається на молекулярному рівні і передбачає передачу енергії від більш енергетичних молекул до тих, що мають нижчий енергетичний рівень. Теплопровідність є результатом взаємодій між цими частинками. У газах і рідинах проведення відбувається внаслідок зіткнень і дифузії молекул під час їхнього хаотичного руху. У твердих тілах це відбувається внаслідок комбінації коливань молекул у кристалічній решітці та перенесення енергії вільними електронами.

При теплопровідності швидкість передачі енергії визначається властивостями матеріалів, пов'язаними зі здатністю передавати рухливість їхніх молекул, властивість відома як теплопровідність. Теплопровідність є співвідношенням передачі тепла через одиничну товщину матеріалу на одиницю площі та одиницю різниці температур. Теплопровідність матеріалу є мірою здатності матеріалу проводити тепло. Високе значення теплопровідності вказує на те, що матеріал є хорошим провідником тепла, а низьке значення вказує на те, що він є поганим провідником або ізолятором.

Конвекція – це механізм передачі тепла через рух маси або циркуляцію всередині речовини. Вона може бути природною, що виникає лише через різницю щільностей речовини, або примусовою, коли речовину змушують переміщуватися з одного місця в інше. Передача тепла конвекцією відбувається в рідинах і газах. Вона виникає, коли більш гарячі частини рідини піднімаються до більш холодних зон, створюючи таким чином постійну циркуляцію рідини і передаючи тепло до холодних зон. Рідини і гази при збільшенні температури зменшують свою щільність. Порожній простір, залишений гарячою рідиною, займає холодна або більш щільна рідина. Конвекція дозволяє передачу енергії із зон вищою температурою в зони нижчою температурою, тому термін «передача тепла» за допомогою конвекції прийнятний. Конвекція – це спосіб передачі енергії між твердою поверхнею та суміжною рідиною або газом, що

рухається, і вона включає поєднані ефекти теплопровідності та руху холодоагенту. Чим швидший рух холодоагенту, тим більше тепла передається за рахунок конвекції, можна виділити головним чином два типи процесу конвекції, враховуючи, чи існує зміна фаз [11, 18]:

- зміна фази: кипіння та конденсація;
- без зміни фази: примусова та природна конвекція.

Примусова конвекція відбувається, коли зовнішня сила переміщує рідину над тілом, яке має іншу температуру. Швидкість, яку набуває рідина, зазвичай задається системою вентилятором або насосом. У природній конвекції кінетична сила виникає внаслідок різниці щільності в рідині і результатує від тертя з тілом з іншою температурою, цей феномен призводить до плавучості в якій беруть участь підйомні сили. Швидкість потоку при природній конвекції в основному залежить від трьох факторів: різниця температур між тілом і потоком, також впливає зміна щільності на одиницю різниці температур або, як її ще називають, коефіцієнт теплового розширення і залежить від силового поля, що виникає через силу тяжіння. Найбільш помітна різниця між природною та вимушеною конвекцією полягає у швидкості потоку, відповідно, передається більше тепла при певній різниці температур. Процес здійснюється для досягнення збільшення теплопередачі.

Розрахунок сушильної камери [18]

$$A = 0,75 \text{ m} \cdot 0,49 \text{ m}$$

$$A = 0,367 \text{ m}^2$$

$$A = (0,75 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}) + 2(0,49 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m})$$

$$A = 0,865 \text{ m}^2$$

Потік повітря, що виходить з вентилятора

$$Q = \dot{m}(h_{int} - h_{ext})$$

$$Q = 1,655 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(309,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 293,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 26,314 \text{ W} = 2273,52 \frac{\text{kJ}}{24 \text{ h}}$$

Потрібна потужність у сушильній камері [18]

$$Q = 878,428 \frac{\text{kJ}}{24 \text{ h}} + 2273,52 \frac{\text{kJ}}{24 \text{ h}} + 912,384 \frac{\text{kJ}}{24 \text{ h}}$$

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

Система теплового насоса оснащена чотирьохходовим клапаном, що дозволяє змінювати цикл нагрівання/охолодження циклом охолодження/нагрівання в тих же камерах, базуючись на часі сушіння для рослинної сировини відповідно до кількості вологи, яку можна видалити з продукту без впливу на його якісні характеристики під час процесу сушіння.

Під час циклу нагріву повітря, яке поглинуте зовнішнім блоком, передає тепло холодоагенту. Після проходження через випарник цей холодоагент перетворюється на газ, який потім подається до компресора, що підвищує тиск і температуру охолоджуючої рідини завдяки виконаній роботі. Повністю нагрітий холодоагент передає своє тепло воді в нагрівальному контурі конденсатора. Електрична система керує компресором, вентилятором та налаштуваннями температури для системи теплового насоса. Під час циклу охолодження тепловий насос з повітряним джерелом змінює свій цикл нагрівання. Система теплового насоса затягує гаряче повітря у внутрішній блок. Зовнішній пристрій потім охолоджує гарячий холодоагент, коли він проходить крізь нього. Внаслідок цього тепла енергія виділяється в повітря і холодоагент стає рідким [23]. Параметрична схема процесу сушіння рослинної сировини із застосуванням теплового насосу наведена на рисунку 2.4.

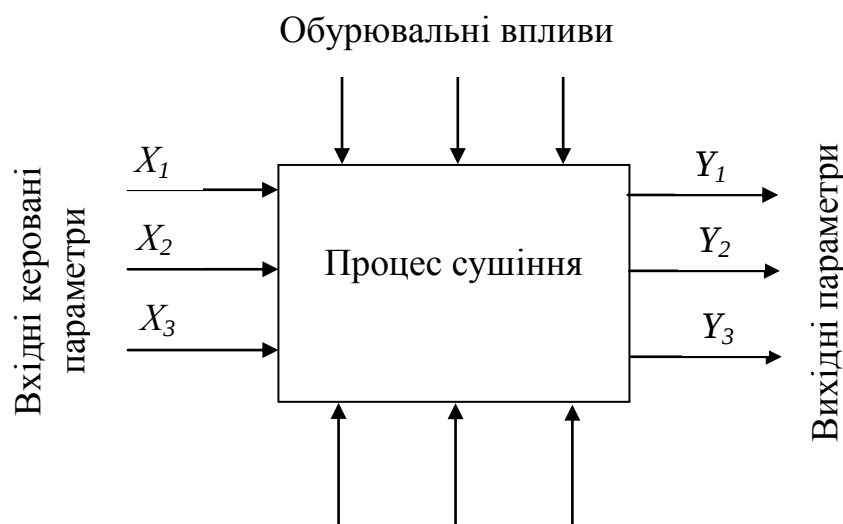


Рисунок 2.4 – Параметрична схема процесу сушіння рослинної сировини із застосуванням теплового насосу

На основі вище зазначеного можна вважати, що використання теплових насосів є фундаментальним для збереження навколишнього середовища, оскільки вони зменшують використання палива та викиди CO₂, зменшують споживання енергії у порівнянні із сушарками, що використовують електричні нагрівальні елементи. Теплові насоси працюють за тим же принципом, що й холодильне обладнання, однак у них зворотний режим роботи. Робота теплового насоса базується на термодинамічному циклі, також відомому як цикл охолодження, що дозволяє передавати тепло з холоднішої області до теплішої або навпаки, що забезпечує ефективне нагрівання або охолодження. Такий пристрій складається з кількох основних компонентів, які працюють разом у різних фазах.

Основними елементами, що складають тепловий насос є: компресор, конденсатор, розширювальний клапан та випарник. На основі розрахунків обрано компоненти теплового насосу, які включають спіральний компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. У випадку теплових насосів розширювальний клапан змінює напрямок холодильного циклу так, що теплообмінник, який в циклі працює як випарник, починає функціонувати як конденсатор, а теплообмінник, що виконує роль конденсатора, може працювати як випарник, що дозволяє тепловим насосам мати спеціальну функцію для зміни режиму роботи в одному і тому ж обладнанні, а саме забезпечення нагрівання або охолодження просто активуючи бажаний цикл. Тому система теплового насоса оснащена чотирьохходовим клапаном, що дозволяє змінювати цикл нагрівання/охолодження циклом охолодження/нагрівання в тих же камерах, базуючись на часі сушіння для рослинної сировини відповідно до кількості вологи.

Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря. Тепловий насос підключений до сушарки, що є складною системою через взаємозалежність усіх її елементів, бо будь-яка зміна в одному з компонентів неминуче впливає на інші складники системи. Електрична система керує компресором, вентилятором та налаштуваннями температури для системи теплового насоса, а система теплового насосу працює за принципом рекуперації енергії.

Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння – це сукупність елементів, що беруть участь у русі повітря, де циркулює нагріте повітря, яке проходить через сировину, забирає вологу та переносить її до випарника теплового насоса. Дана підсистема розглядається як відкрита підсистема через обмін енергією з тепловим насосом. До її складу входить сушильна камера та вентилятор, що забезпечує створення руху повітря на основі передачі механічної енергії повітрю через ротор, який обертається на високій швидкості і підвищує кінетичну енергію потоку, задля видалення вологого повітря та забезпечення активної циркуляції.

Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння. Використання теплового насоса спрямоване на реалізацію стратегії, що забезпечує нагрівання, охолодження та рекуперацію повітря. Завдяки цьому сушіння за допомогою теплового насоса може забезпечити високу ефективність та якість отриманої сушеної сировини.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Параметри якості сировини сушеною тепловим насосом

Сушарки з тепловим насосом відомі своєю енергоефективністю при використанні в поєднанні з операцією сушіння. Основними перевагами сушарки з тепловим насосом є функція теплового насоса, яка відновлює вивільнену енергію, та функція контролю температури та вологості сухого газу. Конструкцію компонентів і системи необхідно оптимізувати для підвищення енергозберігаючої здатності систем теплового насоса. Однією з технологічних характеристик сушарки з тепловим насосом є те, що можна контролювати та регулювати різні змінні, такі як температура, вологість та час сушіння. Система може працювати при абсолютній вологості, меншій за навколишнє середовище, має здатність встановлювати температуру сушіння нижчу або вищу за температуру навколишнього середовища та здатність сушити в камері без вентиляції, використовуючи модифіковану атмосферу сушіння, герметичну та ізольовану від навколишнього середовища. Якість висушених продуктів покращується завдяки сушінню за допомогою теплового насоса, зберігаючи низку фізичних, хімічних та сенсорних характеристик [10]:

1. Мікробна безпека. Наявність мікроорганізмів у сільськогосподарській продукції впливає на якість висушених продуктів, що також зменшує їхній термін зберігання та погіршує якість. Завдяки сушінню сировини мікробні ураження цих продуктів мінімізуються або зводяться до нуля. Використання сушарки з тепловим насосом значно підвищує мікробну безпеку, забезпечуючи відповідність сировини мінімальним стандартам підготовки. Кількість води, що міститься в їжі, сприяє швидкому росту та розвитку мікроорганізмів. Сушарки з тепловим насосом можуть покращити мікробіологічну безпеку висушених продуктів, підтримуючи відносну вологість на прийнятно низькому рівні. Крім того, температура при якій працюють сушарки з тепловим насосом, не обмежується вологою навколишнього середовища.

2. Колір. Руїнування кольору є однією з основних причин втрат при сушінні продуктів харчування. Колір продуктів харчування важливий для їх прийнятності. Хоча поверхнево-активні речовини гальмують ферментативне та неферментативне потемніння, їх використання пов'язане з проблемами здоров'я та безпеки. У сушарках з тепловим насосом це є важливим, оскільки, так само як можна контролювати вологість, можна контролювати й температуру продукту. Контроль температури мінімізує зміну кольору і продукти не змінюють різко свій фізичний вигляд. Фрукти, овочі та інші сільськогосподарські продукти зберігають свої фізичні характеристики, такі як колір і зберігається якість продуктів при використанні теплових насосів для

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Корінь			Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії				Лім.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Омельченко									39	5	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко											
Затверд.		Цвіркун											

сушіння.

3. Аромат та смак. Деякі з основних змін, які можуть виникати стосовно свіжого та висушеного продукту, пов'язані з ароматом і смаком; а також кольором та текстурою. Методи висушування, які використовують низькі температури в процесі сушіння продуктів харчування, забезпечують високу концентрацію ароматичних сполук. Також рівні смаку змінюються в меншій мірі.

4. Збільшення терміну зберігання. Сушіння за допомогою сушарок з тепловим насосом дозволяє ефективно збільшувати термін використання продуктів. У висушених продуктах харчування можуть відбуватися втрати вітамінів, мінералів та поживних речовин сільськогосподарської продукції, що залежатиме від типу застосованого процесу сушіння та від обробки та поводження з продуктом перед сушінням. Сушіння за допомогою теплового насоса покращує умови якості, підвищуючи їх подальшу життєздатність. Втрати вітамінів більші, коли сушіння здійснюється іншими типами сушарок, оскільки контроль температури та відносної вологості є ускладненим.

5. Регідратація. Регідратація не є просто процесом, протилежним дегідратації, оскільки управляють різними способами перенесення речовини та енергії. Під час зневоднення за допомогою теплового насоса можна спостерігати значні зміни фізичних властивостей фруктів і овочів у міру видалення води із сировини. Регідратація є процесом зволоження сушених продуктів. Процес регідратації включає наступне: у більшості випадків сушені продукти занурюють у воду перед споживанням, тому регідратація є дуже важливим критерієм.

3.2 Контроль температури в сушарці з тепловим насосом

Сушіння є одним із способів збереження сировини, а основною метою сушіння є зменшення вмісту вологи у продукті для досягнення тривалішого терміну зберігання, виробляючи сухий продукт бажаної якості з мінімальними витратами. Сушіння є однією з найпоширеніших технологій збереження продуктів харчування. Проте обладнання для сушіння повинно мати коротші процеси, що забезпечує вищу якість продукту, менше забруднення та більшу додану вартість. Деякі технологічні змінні під час процесу сушіння можна контролювати, такі як температура, відносна вологість, потік повітря. Проте важливо оптимізувати конструкцію та умови роботи сушильного обладнання. Технологія сушки за допомогою теплового насоса досягає всіх цих цілей, сушачи під контрольованими умовами, такими як температура та вологість.

В роботі запропоновано удосконалену конструкцію сушарки з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції повітря, яка працює у замкнутому середовищі з повною рециркуляцією висушеного повітря (рис. 3.1). Потік повітря з навколишнього середовища подається в камери сушіння та охолодження за допомогою двох вентиляторів, по одному в кожному каналі, які змушують повітря з навколишнього середовища проходити через теплообмінники, що виконують функцію конденсатора та випарника. У камері 1 повітря нагрівається від температури навколишнього середовища до

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури, що відповідає циклу Карно за певний час [10, 11, 22]. У камері 2 поданий потік повітря через теплообмінник, що виконує функцію випарника, охолоджує повітря до температури нижче, що відповідає циклу Карно, видаляючи відносну вологість повітря із сировини. Після заповнення обсягу сушильного повітря в кожній камері частина його рециркулюється, змішуючись із новим повітрям. Зовнішній конденсатор поєднаний із внутрішнім конденсатором, соленоїдний клапан контролює подачу холодоагенту до зовнішнього конденсатора для видалення надлишку тепла, коли температура сушильного повітря висока щодо часу охолодження камери два.

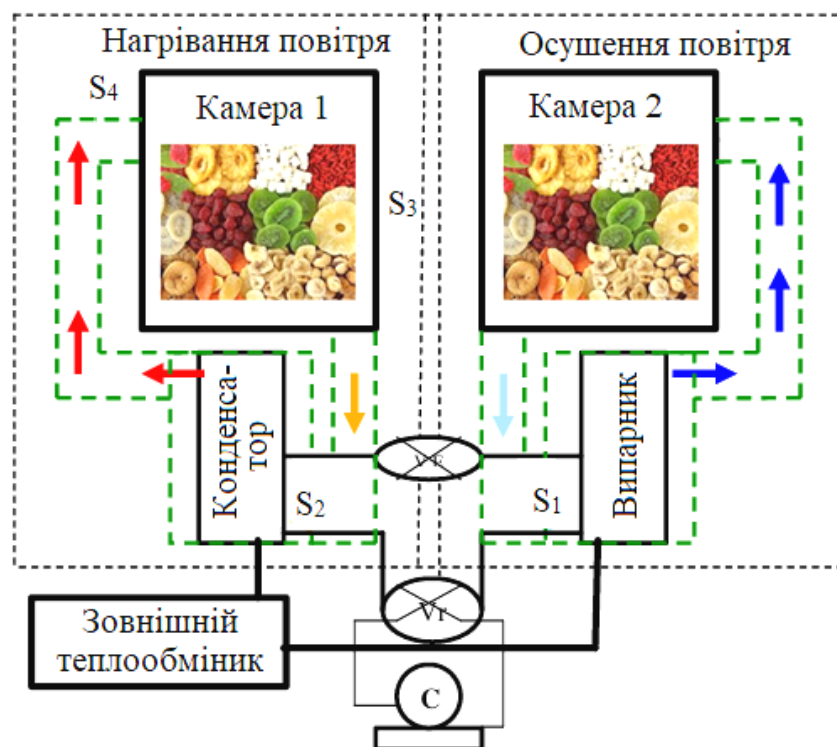


Рисунок 3.1 – Обладнання для сушіння з тепловим насосом оснащене датчиками температури та відносної вологості

Запропоновано систему сушіння з тепловим насосом розглядати, як взаємодію двох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння, тобто це сукупність елементів, що беруть участь у русі повітря (камери, вентилятори), яка розглядається як відкрита підсистема через обмін енергією з тепловим насосом. Друга підсистема (тепловий насос) є закритою підсистемою, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі. Сушильна камера має дві внутрішні камери, сім лотків для продукції в кожній камері, окремий відсік для теплового насоса.

Під час сушіння сировини зовнішній високотемпературний тепловий насос циклічно нагріває сушарку. Коли температура досягне встановленого значення, тепловий насос припинить роботу і коли температура в кімнаті сушильної машини буде нижчою за задану температуру, тепловий насос автоматично активується для нагрівання сушильної камери [23]. Система осушення теплового насоса також є автоматичною і визначається температурою. Коли середовище в сушильній кімнаті досягає такого

заздалегідь визначеного значення, вентилятор для осушувача автоматично вмикається, і водяний пар, який тягне витяжний вентилятор, потрапляє у кімнату теплового насоса у злив разом із потоком повітря. Якщо температура та вологість у сушильній кімнаті нижчі за встановлене значення, витяжний вентилятор автоматично активується для завершення.

Вважається за доцільне температуру повітря контролювати за допомогою цифрового термостата, який вмикає та вимикає тепловий насос для підтримки бажаної температури. Датчики температури та вологості встановлені всередині камери сушіння на вході в випарник та на виході з конденсатора [10, 11, 25]. Температура сушіння контролюється та відстежується в діапазоні від 55° до 60°C. Мінімальна відносна вологість становила 15% у камері сушіння під час сушіння рослинної сировини.

Компресор стискає холодоагентний газ, який циркулює по трубах теплового насоса, щоб відбувалося розширення та випаровування. Компресор керується термостатом, який вмикає або вимикає його залежно від температури камери осушення. Сушарка з тепловим насосом оснащена датчиками температури та відносної вологості, розташованими у робочих зонах осушувача. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї зони в іншу для його максимального використання, таким чином досягається оптимізація енергії, що використовується у процесі сушіння.

S₁ – датчик температури та відносної вологості з реєстратором даних на виході випарника для запису температури та вологості повітря, яке було осушене;

S₂ – датчик на виході конденсатора контролює температуру та вологість повітря після його нагрівання;

S₃ – датчик у центральній частині камери сушіння для моніторингу температури та вологості на продукті;

S₄ – датчик на виході камери сушіння, щоб знати вологість повітря та температуру після циклу дегідратації.

Сушарки з тепловим насосом здійснюють енергоефективний процес, забезпечуючи систему теплом та відновлюючи його через внутрішню роботу теплового насоса. Будь-яку сушарку, яка використовує конвекцію як основний спосіб подачі тепла в сушарку (з додатковим постачанням тепла або без нього іншими способами передачі тепла), можна обладнати відповідно спроектованим тепловим насосом. Розвиток технології сушіння стимулював потребу заощадження енергії, виробництва продуктів харчування кращої якості, які вимагають споживачі та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Переваги, які пропонують такого типу сушарки [24]:

- висока енергоефективність із відновленням тепла, що призводить до мінімального споживання на одиницю видаленої води;
- краща якість продукту завдяки контролю температури;
- широкий діапазон умов сушіння від -20°C до 100°C.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння є одним із способів збереження сировини, а основною метою сушіння є зменшення вмісту вологи у продукті для досягнення тривалішого терміну зберігання, виробляючи сухий продукт бажаної якості з мінімальними витратами. Запропоновано

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

удосконалену конструкцію сушарки з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції повітря, яка працює у замкнутому середовищі з повною рециркуляцією висушеного повітря. Сушарки з тепловим насосом здійснюють енергоефективний процес, забезпечуючи систему теплом та відновлюючи його через внутрішню роботу теплового насоса.

В роботі запропоновано удосконалену конструкцію сушарки з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції повітря, яка працює у замкнутому середовищі з повною рециркуляцією висушеного повітря. Потік повітря з навколишнього середовища подається в камери сушіння та охолодження за допомогою двох вентиляторів, по одному в кожному каналі, які змушують повітря з навколишнього середовища проходити через теплообмінники, що виконують функцію конденсатора та випарника. Сушильна камера має дві внутрішні камери, сім лотків для продукції в кожній камері, окремий відсік для теплового насоса. У камері 1 повітря нагрівається від температури навколишнього середовища до температури, що відповідає циклу Карно за певний час. У камері 2 поданий потік повітря через теплообмінник, що виконує функцію випарника, охолоджує повітря до температури нижче, що відповідає циклу Карно, видаляючи відносну вологість повітря із сировини. Після заповнення обсягу сушильного повітря в кожній камері частина його рециркулюється, змішуючись із новим повітрям. Зовнішній конденсатор поєднаний із внутрішнім конденсатором, соленоїдний клапан контролює подачу холодоагенту до зовнішнього конденсатора для видалення надлишку тепла, коли температура сушильного повітря висока щодо часу охолодження камери два.

Вважається за доцільне температуру повітря контролювати за допомогою цифрового термостата, який вмикає та вимикає тепловий насос для підтримки бажаної температури. Датчики температури та вологості встановлені всередині камери сушіння на вході в випарник та на виході з конденсатора. Температура сушіння контролюється та відстежується в діапазоні від 55° до 60°C. Компресор стискає холодоагентний газ, який циркулює по трубах теплового насоса, щоб відбувалося розширення та випаровування. Компресор керується термостатом, який вмикає або вимикає його залежно від температури камери осушення.

Сушарка з тепловим насосом оснащена датчиками температури та відносної вологості, розташованими у робочих зонах осушувача. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї зони в іншу для його максимального використання, таким чином досягається оптимізація енергії, що використовується у процесі сушіння. Запропоновано встановлення датчиків контролю: S_1 – датчик температури та відносної вологості з реєстратором даних на виході випарника для запису температури та вологості повітря, яке було осушене; S_2 – датчик на виході конденсатора контролює температуру та вологість повітря після його нагрівання; S_3 – датчик у центральній частині камери сушіння для моніторингу температури та вологості на продукті; S_4 – датчик на виході камери сушіння, щоб знати вологість повітря та температуру після циклу дегідратації.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії. У роботі зазначено, що традиційні джерела енергії, що використовуються у переробці харчової сировини мають значні екологічні наслідки, включаючи викиди парникових газів. Тому є необхідність в застосуванні відновлювальних джерел енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії у підприємства харчової промисловості пропонує безліч переваг, що охоплюють економічні та екологічні аспекти, що призводить до суттєвих екологічних переваг шляхом зменшення викидів парникових газів. Використання чистих джерел енергії сприяє зниженню викидів вуглецю, допомагаючи підприємствам харчової промисловості відповідати цілям сталого розвитку та нормативним вимогам.

У першому розділі здійснено аналіз альтернативних технологій сушіння рослинної сировини. Аналіз наукових джерел дав змогу виявити, що у процес сушіння за допомогою теплового насоса має здатність відновлювати приховане та відчутне тепло шляхом конденсації вологи з повітря для сушіння, чого не можуть робити інші методи сушіння. Тепло, що генерується, повторно циркулює назад у сушарку шляхом нагрівання зневодненого повітря для сушіння. Таким чином, енергоефективність значно зростає в результаті відновлення циркулюючого тепла, яке інакше було б втрачено в атмосферу при використанні інших традиційних сушарок. Використання теплових насосів є фундаментальним для збереження навколишнього середовища, оскільки вони зменшують використання палива та викиди CO₂, зменшують споживання енергії у порівнянні із сушарками, що використовують електричні нагрівальні елементи.

Зазначено, що сушіння сировини за допомогою сонячних сушарок є відновлюваною альтернативою. Сонячна енергія – це відновлювана енергія, яка отримується від сонця і з якою можна генерувати тепло та електрику, що здійснюється за допомогою різних колекторів, таких як фотогальванічні елементи або теплові колектори, таким чином сонячна енергія може перетворюватися на теплову або електричну. Сонячні сушарки працюють шляхом захоплення сонячної енергії через сонячні панелі або пристрої для рекуперації тепла, які нагрівають повітря, що використовується для сушіння продуктів. Важливою перевагою сонячної сушарки є те, що вона не викидає парникові гази і не виробляє токсичних відходів, що робить її більш екологічною та сталою, ніж звичайні сушарки. Також існують гібридні сушарки на основі поєднання теплового насосу із сонячною підтримкою, що є ефективним у скороченні часу сушіння та споживання енергії.

Другий розділ присвячено оптимізації конвекційної сушарки з тепловим насосом. Основними елементами, що складають тепловий насос є: компресор,

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Корінь			Удосконалення обладнання харчових виробництв із використанням відновлюваних джерел енергії				Лім.	Арк.	Аркуші		
Перевір.		Омельченко									44	2	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко											
Затверд.		Цвіркун											

конденсатор, розширювальний клапан та випарник. На основі розрахунків обрано компоненти теплового насоса, які включають спіральний компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Система теплового насоса оснащена чотирьохходовим клапаном, що дозволяє змінювати цикл нагрівання/охолодження циклом охолодження/нагрівання в тих же камерах, базуючись на часі сушіння для рослинної сировини відповідно до кількості вологи.

Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря. Тепловий насос підключений до сушарки, що є складною системою через взаємозалежність усіх її елементів, бо будь-яка зміна в одному з компонентів неминуче впливає на інші складники системи. Електрична система керує компресором, вентилятором та налаштуваннями температури для системи теплового насоса, а система теплового насоса працює за принципом рекуперації енергії.

Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння – це сукупність елементів, що беруть участь у русі повітря, де циркулює нагріте повітря, яке проходить через сировину, забирає вологу та переносить її до випарника теплового насоса. Дана підсистема розглядається як відкрита підсистема через обмін енергією з тепловим насосом. До її складу входить сушильна камера та вентилятор, що забезпечує створення руху повітря на основі передачі механічної енергії повітрю через ротор, який обертається на високій швидкості і підвищує кінетичну енергію потоку, задля видалення вологого повітря та забезпечення активної циркуляції.

Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння. Використання теплового насоса спрямоване на реалізацію стратегії, що забезпечує нагрівання, охолодження та рекуперацію повітря. Завдяки цьому сушіння за допомогою теплового насоса може забезпечити високу ефективність та якість отриманої сушеної сировини.

В третьому розділі оптимізовано систему контролю, яка включає: датчик контролю температури та відносної вологості з реєстратором даних на виході випарника; датчик на виході конденсатора для контролю температури та вологості повітря після його нагрівання; датчик у центральній частині камери сушіння для моніторингу температури та вологості на продукті; датчик на виході камери сушіння, щоб знати вологість повітря та температуру після циклу дегідратації.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Праховник А.В., Суходоля О.М. Енергозбереження в промисловості. Частина 1. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 180 с.
2. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії / О.І. Соловей, Ю.А. Лега, В.П. Розен, О.О. Ситник, А.В. Черкаси: ЧДТУ, 2007. 483 с.
3. Ефективність використання енергоресурсів та реалізації енергозберігаючих заходів в Україні / Під. заг. ред. С.П. Денисюка. К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. 142 с.
4. Desarrollo de una secadora automática para cacao de alta capacidad mediante flujo de aire caliente. URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29329/1/UPS-GT005947.pdf>.
5. Sistema automático de secado de granos de café accionado con energía solar. URL: <https://www.academia.edu/91264785/>.
6. Diseño y simulación de un secador de gramíneas mediante la implementación de colectores solares. URL: <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/a0e847b8-79da-42a6-ac80-8c35e2ed749b/content>.
7. Енергоефективні технології / А.С. Мандрика та ін.; за заг. ред. А.С. Мандрики. Суми : Сумський державний університет, 2021. 330 с.
8. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання / В.В. Клименко та ін.; за ред. В.В. Клименка. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2023. 268 с.
9. Краснянський М.Ю. Енергозбереження. К.: Кондор. 2025. 136 с.
10. Construcción y pruebas de funcionamiento de un deshidratador por bomba de calor. URL: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/c8b81a7b-5a5b-4475-b4e1-e2f0c8ce34b0/content>.
11. Diseño y construcción de una bomba de calor con R600a para el secado de 25 kg/día de arroz con cáscara mediante convección forzada. URL: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18540>.
12. Diseño de sistema idóneo para el secado de granos de café en costa rica, cuyo funcionamiento parta de la utilización de energías renovables. URL: <http://repositorio.uia.ac.cr:8080/server/api/core/bitstreams/178f3f69-9cea-4c86-aca9-c962ccf6c720/content>.
13. Використання теплових насосів у процесах сушіння. Режим доступу: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/ce477d6e-fe94-4b52-9138-ea399b80eee6/content>.
14. Типи компресорів для теплових насосів. Режим доступу: <https://reneco.com.ua/stati-ua-teplovih-nasosi/typy-kompressorov-dlya-teplovih-nasosov/>.
15. Спиральні компресори для теплових насосів. Режим доступу: <https://pholod.com.ua/catalog/dlya-teplovih-nasosov-s-vpryskom-para>.
16. Renewable energy integration in food processing facilities: a review. URL: <https://www.ijfans.org/uploads/paper/94ea7b6e170867c7fe40fcd7998a2aa9.pdf>.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

17. Evaluación de la eficiencias' térmica teórica y experimental de dos geometrías en un colector solar de placa plana. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3705394>.

18. Diseño y construcción de una bomba de calor aire-aire con capacidad de 12000 btu/h para secado de cacao. URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16927/1/UPS-ST003944.pdf>.

19. Конденсатори, випарники. Режим доступу: <https://opeks.ua/ua/kondensatori-viparniki/>.

20. Пластинчаті конденсатори. Режим доступу: <https://bts.net.ua/ua/technological-equipment/teploobmenniki/plate-heat-exchangers/plate-capacitors/>.

21. Принцип роботи теплового насоса: як працює і його будова. Режим доступу: <https://xn--e1aamjjfht.com.ua/pryntsyp-roboty-teplovoho-nasosa-i-yak-pratsyuue>.

22. Diseño de un secador con bomba de calor de doble cámara. URL: https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/1219/1/694_2006_CIDIR-OAXACA_MAESTRIA_sanchez_olivera_romanfidel.pdf.

23. Componentes clave necesarios para el funcionamiento de la bomba de calor. URL: <https://www.newntide.com/es/blog/simple-diagrams-and-operation-guide-of-heat-pump/>.

24. Diseño de sistema híbrido con ahorro de energía: bomba de calor-energía solar. URL: https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/1219/1/694_2006_CIDIR-OAXACA_MAESTRIA_sanchez_olivera_romanfidel.pdf.

25. Датчики та засоби керування тепловим насосом: що потрібно знати для оптимальної роботи. <https://www.goodheatglobal.com/uk/Heat-Pump-Sensors-and-Controls-What-You-Should-Know-for-Optimal-Performance-id43649106.html>.

26. Енергоефективна технологія сушіння та зберігання насіння зернових культур із використанням теплових насосів. Режим доступу: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/September2020/fCCER2Y8l3Vx2TXBMLtw.pdf>.

27. Пазюк В.М. Теплові насоси як засіб підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету в сфері технічні науки. Вінниця, ВНАУ, 2012. № 11. С. 375 – 378.

28. Comprehensive assessment of a solar-assisted heat pump dryer integrated with thermal energy storage materials: performance, techno-economic viability, and life cycle analysis. URL: file:///C:/Users/admin/Downloads/PhD_MaSE_Ald%C3%A9_%20Loemba_2024%20.pdf.

29. Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування. Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6436/1/27.pdf>.

30. Способи сушіння. Режим доступу: <https://buklib.net/books/29614/>.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47