

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

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробної і харчової
промисловості»
Хорольський В.П.
« ____ » _____ 2024 року

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

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СУШКИ
ТОМАТІВ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ»**

Виконав:
здобувач вищої освіти _____ **Чижик Олег Леонідович** _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

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

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2024

5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Криві сушіння.

Схеми обладнання для сушіння сировини.

Оптимізація параметрів сушіння томатів.

Модель процесу сушіння томатів комбінованим інфрачервоним та конвективним нагрівом.

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

7. Календарний план

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

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Чижик О.Л.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цвіркун Л.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура магістерської роботи. Повний обсяг магістерської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 45 сторінок. Робота містить: 16 рисунків. Список використаних джерел складається з 18 найменувань.

Об'єкт роботи – комбінована інфрачервона сушарка.

Предмет роботи – процес сушіння томатів із застосуванням комбінованого інфрачервоного та конвективного нагріву.

Мета роботи – удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості.

У роботі зазначено, що сушіння є одним з найдавніших методів збереження продуктів. Застосовується для збереження сировини, що швидко псується шляхом зменшення вмісту вологи. Процес сушіння дозволяє знизити вартість і складність упаковки, обробки, транспортування і зберігання за рахунок перетворення матеріалу в суху тверду речовину, тим самим зменшуючи його вагу і в більшості випадків обсяг.

На основі аналізу, було зазначено, що крива сушіння відображає співвідношення швидкості сушіння в залежності від часу сушіння або вмісту вологи. На кривій сушіння можна спостерігати три основні етапи сушіння: перехідна рання стадія під час якої продукт нагрівається; період постійної швидкості при якому вологу порівняно легко видалити; період спадаючої швидкості під час якого волога зв'язується або утримується в твердій матриці.

Зазначено, що на якість сушених помідорів впливають низка факторів, таких як зовнішні умови навколишнього середовища, тип сушарки, попередня обробка та властивості зразків, такі як сорт, зрілість та форма. Форма та розмір зразків, що підлягє сушінню, також впливають на час, який необхідний для сушіння і на якість сушених помідорів. Запропоновано засоби оптимізації параметрів сушіння томатів.

Запропоновано комбіноване інфрачервоне та гаряче повітряне сушильне обладнання на основі контролю температури та вологості для сушіння томатів з метою підвищення ефективності та результативності сушіння. Датчик температури PT100 використовувався для вимірювання температури в сушильній камері під час процесу сушіння. Датчиком вологості обрано OMEGA NH71 для вимірювання відносної вологості повітря в сушильній камері під час сушіння томатів. Блок моніторингу даних виконує аналіз температури та вологості в камері у режимі реального часу.

Розроблено модель процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному та конвективному нагріванні. Модель відображає кінетику процесу сушіння томатів при комбінованій технології з врахуванням теплових потоків ПЧ-генератора і потоку гарячого повітря на сушильний об'єкт (томат). Під час роботи сушарки інтерактивний інтерфейс «людина-машина» контролює температуру та вологість сушильної камери.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сушіння, інфрачервона сушарка, конвективна сушарка, модель, кінетика сушіння, томати, температура, вологість.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ СИРОВИНИ ТА КІНЕТИКА СУШІННЯ	7
1.1 Сушіння в харчовій промисловості	7
1.2 Кінетика сушіння сировини	9
1.3 Обладнання для сушіння	13
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ ТОМАТІВ	22
2.1 Оптимізація параметрів сушіння	22
2.2 Удосконалення сушарки на основі поєднання інфрачервоної та конвективної технології	28
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
3.1 Фізичні характеристики сушених томатів	35
3.2 Модель процесу сушіння томатів комбінованим інфрачервоним та конвективним нагрівом	37
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43
ДОДАТКИ	44

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
Розроб.		<i>Чижев</i>			Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості				5	1
Перевір.		<i>Цвіркун</i>								
Н. Контр.		<i>Омельченко</i>			ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО					
Затверд.		<i>Хорольський</i>								

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що сушіння є одним з найдавніших методів збереження продуктів. Застосовується для збереження сировини, що швидко псується шляхом зменшення вмісту вологи. Процес сушіння дозволяє знизити вартість і складність упаковки, обробки, транспортування і зберігання за рахунок перетворення матеріалу в суху тверду речовину, тим самим зменшуючи його вагу і в більшості випадків обсяг.

Мета та задачі дослідження. Метою магістерської роботи є удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що крива сушіння відображає співвідношення швидкості сушіння в залежності від часу сушіння або вмісту вологи. На кривій сушіння можна спостерігати три основні етапи сушіння: перехідна рання стадія під час якої продукт нагрівається (перехідний період); період постійної швидкості при якому вологу порівняно легко видалити; період спадаючої швидкості під час якого волога зв'язується або утримується в твердій матриці.

Зазначено, що на якість сушених помідорів впливають низка факторів, таких як зовнішні умови навколишнього середовища, тип сушарки, попередня обробка та властивості зразків, такі як сорт, зрілість та форма. Форма та розмір зразків, що підлягає сушінню, також впливають на час, який необхідний для сушіння і на якість сушених помідорів, чвертинки сушилися на 8,3% швидше, ніж половинки. Запропоновано засоби оптимізації параметрів сушіння томатів.

Запропоновано комбіноване інфрачервоне та гаряче повітряне сушильне обладнання на основі контролю температури та вологості для сушіння томатів з метою підвищення ефективності та результативності сушіння. Датчик температури PT100 використовувався для вимірювання температури в сушильній камері під час процесу сушіння. Датчиком вологості обрано OMEGA HX71 для вимірювання відносної вологості повітря в сушильній камері під час сушіння томатів. Блок моніторингу даних виконує аналіз температури та вологості в камері у режимі реального часу. Дані моніторингу в сушильній камері відображаються в режимі реального часу на сенсорному екрані взаємодії людини з комп'ютером, що дозволяє оператору приймати обґрунтовані рішення та за необхідності регулювати режими.

Розроблено модель процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному та конвективному нагріванні. Модель відображає кінетику процесу сушіння томатів при комбінованій технології з врахуванням теплових потоків ПЧ-генератора і потоку гарячого повітря на сушильний об'єкт (томат). Під час роботи сушарки інтерактивний інтерфейс «людина-машина» контролює температуру та вологість сушильної камери.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Чижик</i>				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						6	1
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ СИРОВИНИ ТА КІНЕТИКА СУШІННЯ

1.1 Сушіння в харчовій промисловості

Сушіння є важливою операцією в харчовій промисловості та застосовується для видалення води із сировини. Процес сушіння відбувається за допомогою впливу на матеріал нагрітого повітря в камері, яку називають сушаркою. Процес сушіння може бути досягнуто природними засобами, такими як сонячне сушіння, коли сонце забезпечує енергію, яка необхідна для видалення води з харчового продукту [1, 2]. Зазвичай термін сушіння означає видалення відносно невеликої кількості вологи з твердої або майже твердої сировини шляхом випаровування. Таким чином, сушіння включає в себе як тепло, так і масообмінні операції одночасно.

Операції з осушення є важливими етапами в харчовій промисловості. Основним завданням сушіння харчових продуктів є видалення води в твердих речовинах до певного рівня при якому мікробне псування і псування хімічних реакцій значно зводяться до мінімуму. Широке розмаїття харчових продуктів, які сьогодні доступні споживачеві (снеки, сухі суміші та супи, сухофрукти тощо), вимагає дотримання умов сушіння, які забезпечать якісні споживчі цінності, а саме: колір, смак, текстуру. Розглянемо причини сушіння харчових продуктів [3]:

1. Зменшення псування. Найважливіша причина сушіння сировини полягає в тому, щоб запобігти або зменшити її псування і тим самим створити продукт, який залишається їстівним протягом більш тривалого періоду часу, ніж він залишався б у невисушеному вигляді. Мікроорганізми, що псуються, потребують відповідного рівня вологості, щоб підтримувати свій ріст і розчиняти поживні речовини, які їм потрібні. Без цієї вологи мікроорганізми або будуть лежати в сплячому стані, або гинути. Одними з найбільш часто зустрічаючих мікроорганізмів псування є «цвіль». Колонії росту цвілі часто проявляються у вигляді «нечітких» сірих плям на поверхні харчового продукту. У той час, цвіль, як правило, досить помітна для споживача, інші мікроорганізми, що псуються, можуть бути не так легко помітні.

2. Подовжений термін зберігання. Видалення води може збільшити тривалість часу протягом якого їжа залишається їстівною. Наприклад, сушені ягоди зберігаються довше, ніж в свіжому невисушеному вигляді. У багатьох випадках воду можна додавати назад у висушені продукти, такі як сушені ягоди, щоб зволжити їх і відновити багато властивостей початкового продукту.

3. Змінені умови зберігання. Усі продукти харчування вимагають певних

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Чижик</i>				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						7	15
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>					Кафедра ЗІДО		

умов для запобігання їх псуванню. Також бажано зберегти їх смакові якості, поживні властивості, наприклад, аромат. Для цього можуть знадобитися спеціальні умови зберігання, такі як заморожування або охолодження. Якщо їжу можна сушити і зберігати при кімнатній температурі навколишнього середовища або приміщення зменшує витрати на підтримку спеціалізованих умов зберігання. Це також збільшує потенційний ринок збуту продукту коли такі умови зберігання та транспортування не потрібні.

4. Зниження об'єму. Значна частина ваги багатьох харчових продуктів пояснюється наявністю води. Якщо воду можна видалити, вагу можна зменшити, а також зменшити вартість доставки товару. Нерідко спостерігається зміна обсягу, пов'язана із сушінням сировини. У міру видалення води їжа зменшується в розмірах, тим самим займаючи менше місця і дозволяючи відвантажити більше продукту в заданому обсязі [1-3]. Наприклад, актуальним є видалення води з апельсинового соку для створення концентрату апельсинового соку. З апельсиновим соком вода видаляється у процесі концентрації, який не є типовим процесом сушіння. Однак, цей приклад є доречним, щоб показати, як видалення води може бути використане з користю. Видалення води для створення концентрату з 65% сухих речовин замість звичайних 9-10% сухих речовин у свіжовичавленому апельсиновому соку зменшує як вагу, так і об'єм транспортування. Після того, як концентрат прибуде за місцем призначення або буде придбаний споживачем, воду можна додати назад у нього, щоб розбавити його до бажаного кінцевого вмісту води перед споживанням.

5. Підвищена зручність. Багато споживачів хочуть мати зручну їжу. Особливо це актуально в тих випадках, коли може не вистачити часу на приготування страви зі свіжих неперероблених продуктів. Прикладами цього можуть бути зневоднені картопляні пластівці або рис швидкого приготування. Споживач може взяти потрібну порцію сушеного продукту, змішати його з окропом, дати постояти, поки волога не візьметься в сушений продукт, а потім подати його до столу. Завдяки останнім технологічним досягненням така продукція часто є кращою за якістю, ніж аналогічна продукція в свіжому вигляді. Ще одна перевага зневоднених продуктів полягає в тому, що відходи можуть бути зменшені під час приготування споживачем. У випадку з зневодненими картопляними пластівцями споживачеві немає необхідності чистити картоплю та видаляти небажані плями або «погані плями». Весь продукт придатний для використання в покупному вигляді.

6. Змінені властивості. Висушені продукти можуть мати інші властивості, ніж їх невисушені форми. Ці відмінності можуть створювати унікальні продукти, які мають досить нове застосування в порівнянні з оригінальним матеріалом. Крім того, завдяки сушінню може бути додана вартість і створені нові ринки для збільшення використання та комерційної цінності певної сировини [1-3]. Наприклад, сушені продукти, такі як родзинки (з сушеного винограду) і чорнослив (з сушених слив), мають смакові та текстурні відмінності від їх первісної форми. Висушені на сонці родзинки використовуються інакше, ніж виноград, через його змінені властивості, які виникли в результаті видалення води. Сушені яблучні скибочки можна

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати в поєднанні з сушеними злаками для додання посиленого смаку та аромату. Вони також створюють текстурні зміни з пластівців злаків. Хоча сушені яблука не відновлюють характеристики свіжих яблук, коли вони набирають вологу з молока, їх м'яка жувальна текстура досить приваблива та приємна для багатьох людей.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння є одним з найдавніших методів збереження продуктів. Застосовується для збереження сировини, що швидко псується шляхом зменшення вмісту вологи. Процес сушіння дозволяє знизити вартість і складність упаковки, обробки, транспортування і зберігання за рахунок перетворення матеріалу в суху тверду речовину, тим самим зменшуючи його вагу і в більшості випадків обсяг.

1.2 Кінетика сушіння сировини

Під сушінням розуміється видалення вологи або рідини з вологого твердого тіла шляхом переведення цієї вологи в газоподібний стан. У більшості сушильних операцій вода – це рідина, що випаровується, а повітря є сушильним середовищем. Сушіння – це процес одночасного тепло- і масообміну. Тепло, яке необхідне для випаровування, подається до частинок сировини і пари вологи видаляються з матеріалу в сушильне середовище [3-6]. Тепло переноситься конвекцією з навколишнього середовища до поверхонь частинок, а звідти шляхом провідності в сировину. Волога переноситься в зворотному напрямку у вигляді рідини або пари на поверхні, випаровується і переходить шляхом конвекції в навколишнє середовище. Процес сушіння та видалення вологи з продукту за допомогою підведеного до нього тепла розглядається як внутрішня маса і теплопередача (перенесення тепла і вологи всередину) і зовнішня маса і теплопередача (передача тепла і вологи з поверхні виробу).

Сушіння відбувається при випаровуванні рідини шляхом подачі тепла на вологу сировину. Рідина, що видаляється у процесі сушіння, може бути або вільною вологою (незв'язаною) або зв'язаною в структурі твердого тіла. Незв'язана волога, як правило, присутня у вигляді рідкої плівки на поверхні твердої частинки, легко випаровується, в той час як зв'язана волога може знаходитися всередині твердого матеріалу, утримуючись в мікроструктурі твердого тіла (рис. 1.1).

Волога повинна переміщатися на поверхню для випаровування. Коли твердий виріб піддається сушінню, видалення незв'язаної і зв'язаної вологи залежать від швидкостей з якими протікають ці два процеси. Видалення незв'язаної вологи залежить від зовнішніх умов температури повітря або газу, витрати, вологості, площі поверхні і тиску [2-6]. Рух зв'язаної вологи залежить від характеру продукту, що висушується і ступеня вологості всередині продукту. Незв'язана волога в нормі видаляється шляхом випаровування і пароутворення. Підвищення температури сприяє випаровуванню, а повітря витягує вологу. Якщо висушуваний продукт чутливий до нагрівання, то температуру, при якій відбувається випаровування (при температурі кипіння води або іншого розчинника), можна знизити за рахунок зниження тиску за

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

допомогою вакууму. Сушіння включає два різні періоди сушіння, відомі як постійний період сушіння та період спадаючого сушіння (рис. 1.2).

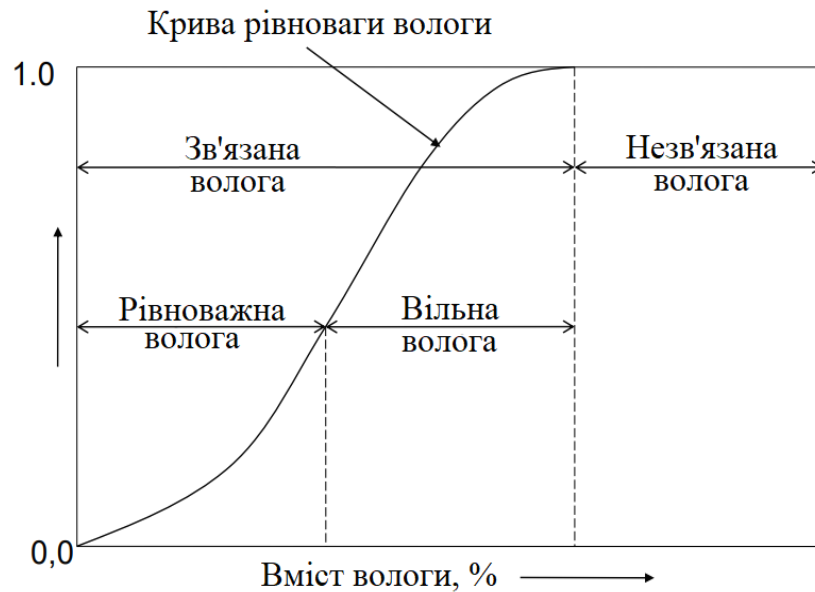


Рисунок 1.1 – Рівноважна волога (вільна волога/зв'язана волога / незв'язана волога)

Під кінетикою сушіння розуміють зміну середньої (інтегральної) вологості (W відсотків) (або вологості U , кг/кг) і середньої температури продукту за час t . Процес сушіння складається з:

- період розігріву залежить від товщини виробу. Вологість продукту знижується по кривій (змінюється незначно) і її температура зростає від початкової до адиабатичної температури насичення вологим повітрям (температура вологого термометра);

- період постійної швидкості сушіння (перший період). У першому періоді сушіння вміст вологи в продукті змінюється по прямій лінії.

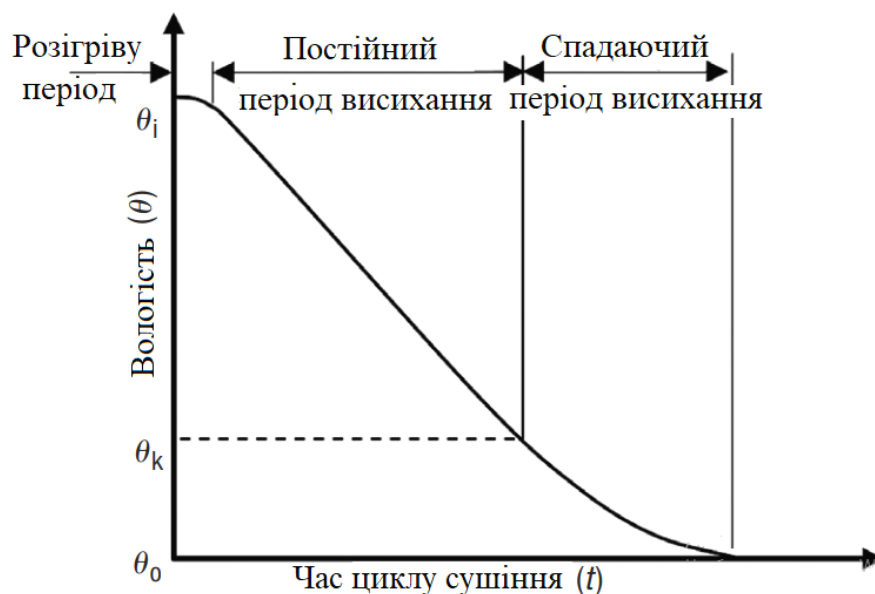


Рисунок 1.2 – Процеси сушіння включають дві різні фази

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Сушіння – це складна операція, що включає перехідну передачу тепла та масообміну. Для випаровування води в продукт необхідно передати відчутне і приховане тепло. Фізичні зміни, які можуть виникнути, включають усадку, зтяжку, кристалізацію та переходи скла. У деяких випадках можуть виникати бажані або небажані хімічні або біохімічні реакції, що призводять до зміни кольору, текстури, запаху або інших властивостей твердого продукту.

Швидкість сушіння – це зменшення вологості матеріалу за одиницю часу. На рисунку 1.3 показані криві швидкості сушіння для різної сировини. Пряма лінія 1 характерна для тонких капілярно-пористих матеріалів з великою питомою поверхнею випаровування (листя); крива 2 характерна для колоїдних тіл; крива 3 для капілярно-пористих матеріалів з малою питомою поверхнею випаровування; криві 4 і 5 для тіл більш складних систем. У період прогріву швидкість сушіння збільшується від 0 до максимального значення N . В період постійної швидкості (перший період) $N = \text{const}$; потім (від критичної точки K_1) швидкість висихання починає падати (другий період).

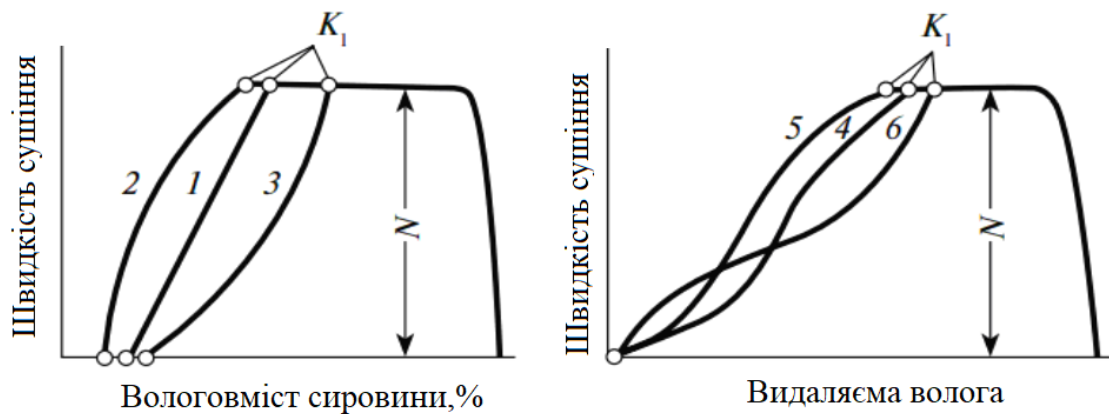


Рисунок 1.3 – Криві швидкості сушіння

Крива сушіння зазвичай відображає співвідношення швидкості сушіння в залежності від часу сушіння або вмісту вологи. На кривій сушіння можна спостерігати три основні етапи сушіння.

- перехідна рання стадія, під час якої продукт нагрівається (перехідний період);
- період постійної швидкості, при якому вологу порівняно легко видалити;
- період спадної швидкості, під час якого волога зв’язується або утримується в твердій матриці.

Типові криві швидкості сушіння представлено на рисунку 1.4. Швидкість сушіння порівняно з часом сушіння та швидкість сушіння порівняно з вмістом води.

Критична вологість – вміст вологи в точці, коли період сушіння змінюється з постійної на спадаючу швидкість. Особливості сушіння харчової сировини залежать від пористості, однорідності та гігроскопічних властивостей. Гігроскопічні харчові матеріали швидше вступають в швидкість падіння в порівнянні з негігроскопічними харчовими матеріалами.

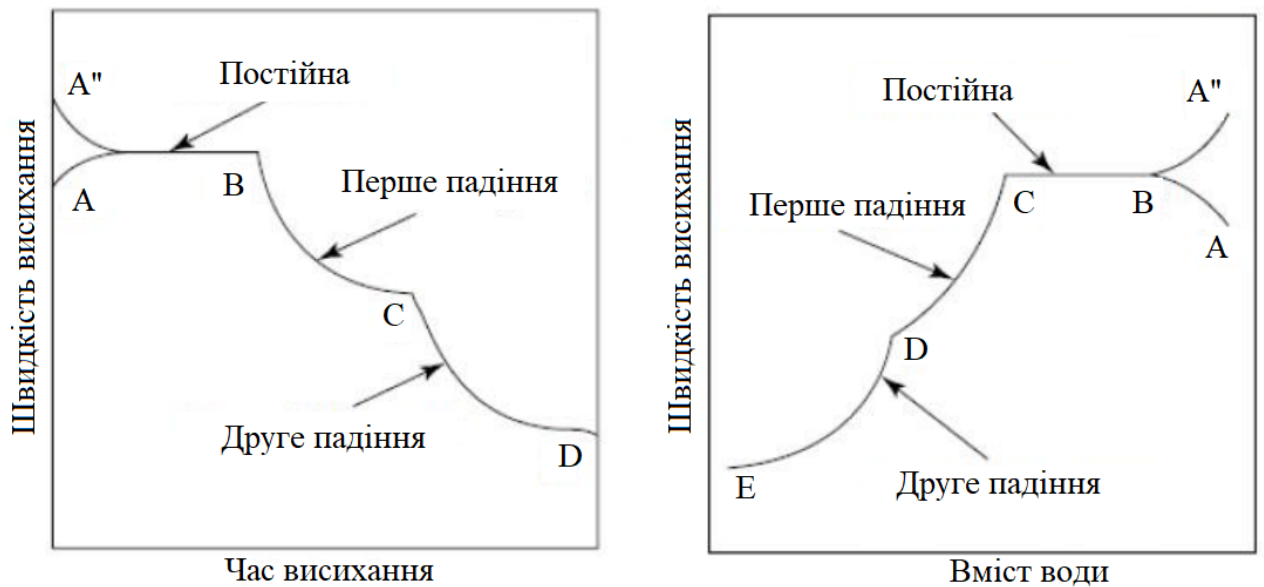


Рисунок 1.4 – Типові криві швидкості сушіння

1. Постійна швидкість висихання спостерігається на ділянці від В до С кривої, відомої, як період постійної швидкості, що являє собою видалення незв'язаної води з продукту. Даний період характеризується наступними показниками:

- поверхня сировини дуже волога і водяна;
- активність води дорівнює одиниці;
- у період постійної швидкості вода ефективно випаровується у вигляді вільної водної поверхні;
- швидкість видалення води може бути співвіднесена зі швидкістю теплопередачі, якщо не відбувається зміни температури матеріалу і тому вся передана йому теплова енергія повинна призводити до випаровування води.

2. Швидкість видалення вологи. Період зниження швидкості (з точки С) настає, коли швидкість висихання починає знижуватися, а активність поверхневої води падає менше ніж до одиниці [1-6]. У цей момент на поверхні недостатньо води, щоб підтримувати значення водної активності на рівні одиниці. Швидкість сушіння регулюється внутрішнім потоком рідини або пари. Період зниження швидкості видалення вологи із сировини можна розділити на два етапи:

- перша швидкість сушіння при падінні (від С до D);
- друга швидкість сушіння при падінні (від D до E).

Перша швидкість висихання при падінні відбувається, коли зволожені плями на поверхні постійно зменшуються, поки поверхня не висохне (точка D). Другий період швидкості падіння починається в точці D, коли поверхня повністю висихає.

Температурні криві необхідні для аналізу процесу сушіння сировини, коли необхідно визначити характер зміни температури продукту T в залежності від його вологості W . На рисунку 1.5 наведені приклади конвективної сушки продуктів різної товщини. При конвективному сушінні на початку процесу,

тобто в період прогріву, температура поверхні продукту підвищується від початкової до вологої температури термометра (t_m).

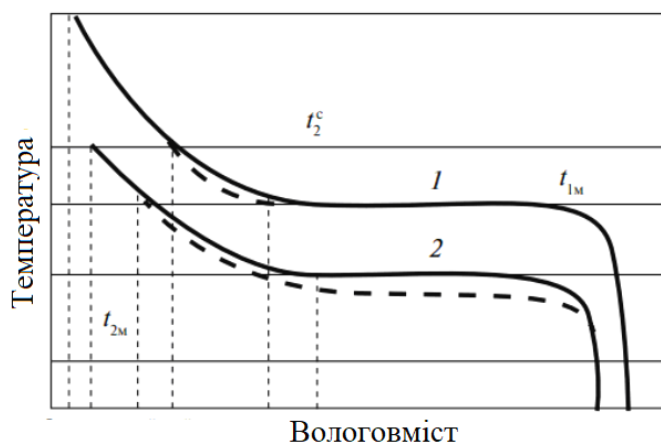


Рисунок 1.5 – Температурні криві сушіння

У перший період сушіння все тепло, що подається виробу, витрачається на випаровування вологи, а температура продукту буде дорівнювати температурі рідини, що випаровується (t_m). Цей період характеризується постійною температурою поверхні продукту і дорівнює температурі випаровування рідини з вільної поверхні ($\theta = T_m$). Починаючи з першої критичної точки другого періоду процесу сушіння підвищується швидкість випаровування вологи з поверхні виробу, а також його температура ($\theta > T_m$). Коли вологість продукту досягає значення рівноважної вологості (швидкість втрати вологи дорівнює нулю), температура продукту стає рівною температурі повітря ($\theta = T_v$).

У перший період сушіння, якщо волога всередині тонкого виробу переміщається у вигляді рідини, температура продукту скрізь залишається однаковою і близька до температури вологого терморегулятора t_m (крива 1). Температура поверхні товстого виробу становить t_{2m} , а в центрі вона менше t_m , тобто в процесі першого сушіння в продукті спостерігається температурний градієнт. Вологість сировини прагне до рівноважного значення, що відповідає температурі і вологості сушильного агенту.

1.3 Обладнання для сушіння

Більшість традиційних методів сушіння ґрунтуються на застосуванні тепла прямим або непрямим шляхом. У разі прямого нагрівання тепло зазвичай приноситься до продукту повітрям, яке було попередньо нагріте до потрібної температури. Функція нагрітого повітря полягає у випаровуванні вологи в продукті та транспортуванні випарованої вологи з сушарки. Повітря можна нагрівати, пропускаючи його через полум'я від газового пальника або подібного джерела тепла. Повітря також можна нагрівати, пропускаючи його по металевих трубках, по яких циркулює пар [1, 3]. Потім гаряче повітря продувається поперек або через продукт, що сушиться. Це варіація найпростішого прикладу прямого нагрівання, який полягає в сушінні чогось на

відкритому вогні. Багато доступних сушильних машин засновані на застосуванні прямого тепла. Прикладом застосування непрямого тепла може бути використання сушильної шафи, яка має металеві стінки, що нагріваються ззовні. Тепло, що випромінюється металевими стінками печі, потім нагріває повітря і продукт в духовці, що в свою чергу сушить продукт. Це непряме застосування тепла, як правило, не таке ефективне, як пряме.

Нетрадиційні методи сушіння також можуть називатися «новими» технологіями сушіння. У міру того, як технології сушіння стають все більш досконаліми, спостерігаються методи видалення води, які спрямовані на мінімізацію застосування тепла. При сушінні харчових продуктів, чутливих до нагрівання, особливо важливо не допустити зниження якості продукту. Тому використовуються методи засновані на енергоефективності. У цих випадках застосування тепла суворо контролюється, щоб уникнути пошкодження сировини, а не просто видалити надмірну кількість тепла за найкоротший проміжок часу.

Більшість сушарок відносяться до прямих сушарок, де гаряче повітря (при тиску, близькому до атмосферного) використовується для подачі тепла для випаровування води або інших розчинників з продукту. Відомо, що багато чинників впливає на якість та ефективність сушіння. До них належать, зокрема, температура, швидкість і напрямок перекачуваного сушильного повітря, його початкова і кінцева вологість, а також тип сушарки. Що стосується особливостей сушіння, то сировину можна розділити на дві групи. До першої групи належать кристалічні або гранульовані тіла у яких в міжмолекулярних щілинах або відкритих порах виявляється волога [1]. До другої групи належать тверді речовини органічного походження у яких волога, хоча і є невід'ємною частиною структури, може бути укладена також у волокна і дрібні внутрішні пори. Механічна сушка представляє собою проведення процесу в сушильних камерах у яких є можливість контролювати параметри процесу.

За способом теплообміну методи сушіння можна розділити на: кондукційне сушіння, конвекційне сушіння та радіаційне сушіння. Існують також інші способи сушіння, а саме діелектричне сушіння, хімічне або сорбційне сушіння, вакуумне сушіння, сублимаційне сушіння тощо. Так, наприклад конвекційне сушіння зазвичай використовується для сушіння всіх видів зерна, а кондукційне сушіння може використовуватися для сушіння пропареного зерна.

Контактна сушка – процес при якому теплова енергія отримується шляхом провідності, коли матеріал відпочиває або рухається на нагрітих поверхнях під час контактного сушіння. Коли тепло для сушіння передається вологому твердому тілу, головним чином, шляхом провідності через тверду поверхню (зазвичай металеву), це явище відоме як провідність або контактне сушіння. У цьому методі провідність є основним способом теплопередачі, а випарована волога видаляється незалежно від нагрівального середовища. Кондуктивна сушка характеризується:

– теплопередача вологому твердому тілу відбувається шляхом теплопровідності через тверду поверхню, зазвичай металеву (джерелом тепла може бути гаряча вода, пара, димові гази, гаряче масло тощо);

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- температура поверхні може змінюватися в широких межах;
- контактні сушарки можуть працювати під низьким тиском та в інертній атмосфері;
- пи́л і пилові матеріали можуть бути дуже ефективно видалені;
- після перемішування більш однорідний висушений продукт і підвищена швидкість сушіння досягаються за допомогою кондуктивного сушіння.

Кондукційне сушіння може здійснюватися безперервно або періодично: циліндричні сушарки, барабанні сушарки, ротаційні сушарки з паровою трубкою є одними з сушарок безперервної провідності. Вакуумні лоткові сушарки, сублімаційні сушарки, сушильні сушарки з перемішуванням є прикладами сушарок періодичної дії.

Сушіння є однією з найбільш енергоємних операцій, що обумовлено високою прихованою теплотою пароутворення води і властивою неефективністю використання гарячого повітря в якості (найбільш поширеного) сушильного середовища. Залежно від необхідних конкретних властивостей сировини харчова промисловість вимагає різних типів технологій сушіння [5, 9]. Сушіння конвекцією при більш високих температурах призводить до того, що термочутливі продукти розкладаються, змінюють колір і зовнішній вигляд і мають нижчий вміст вітамінів або поживних речовин. Конвекційна сушка найбільш популярна при сушінні сировини, але споживає багато енергії.

Конвекційна сушка – процес при якому тепла енергія подається за допомогою нагрівального агента, зазвичай пари або газу. Засіб розтікається по поверхні матеріалу або через шар висушеного матеріалу (рис. 1.6).

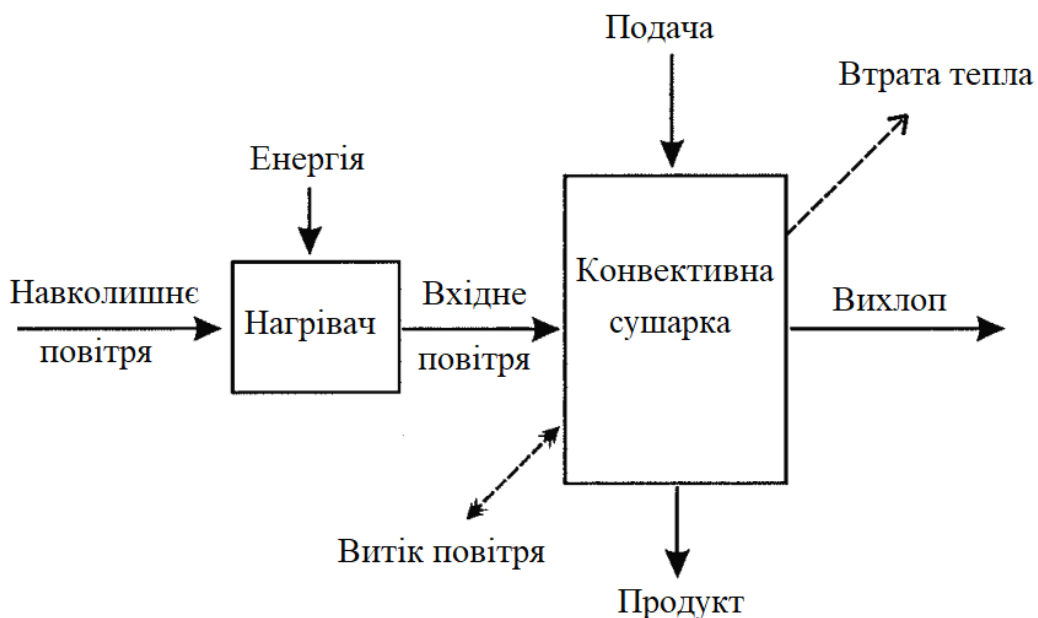


Рисунок 1.6 – Конвекційна сушарка

При конвекційному сушінні використовується сушильний агент (гарячі гази), що контактують з вологою твердою речовиною для подачі тепла і

відведення випаруваної вологи і тепло передається вологому твердому тілу, в основному, шляхом конвекції. Характеристиками конвекційної сушки є:

- сушіння залежить від передачі тепла від сушильного агента до вологого матеріалу, який є носієм випаруваної вологи;
- в якості сушильних агентів може використовуватися парове нагріте повітря тощо;
- температура сушіння варіюється в широких межах;
- при температурі газу нижче точки кипіння вміст парів у газі впливає на швидкість сушіння та кінцевий вміст вологи в твердій речовині;
- якщо атмосферна вологість висока, природне сушіння повітрям потребує осушення;
- витрата палива на кг випаровуваної вологи завжди вища, ніж у кондукційного сушіння.

Радіаційна сушка – матеріал випромінюється тепловою енергією за допомогою радіаторів. Радіаційне сушіння засноване на поглинанні променевої енергії сонця і перетворенні її в теплову енергію. Сушка на сонці є прикладом радіаційної сушки. Радіаційне сушіння можна здійснити також за допомогою спеціальних генераторів інфрачервоного випромінювання, а саме інфрачервоних ламп. Рух і випаровування вологи викликані різницею температур і парціального тиску водяної пари між зерном і навколишнім повітрям. Ефективність сонячного сушіння залежить від температури і відносної вологості атмосферного повітря, швидкості вітру, виду і стану зерна тощо.

Діелектричний – це сушіння шляхом застосування змінного електричного поля, а сублимація – передбачає видалення води із замерзлого матеріалу шляхом сублимації льоду.

Зазвичай, термін сушіння означає видалення відносно невеликої кількості вологи з твердого або майже твердого матеріалу шляхом випаровування. Сушіння включає в себе як тепло, так і масообмінні операції одночасно. При конвективному сушінні тепло, яке необхідне для випаровування вологи з продукту сушіння подається зовнішнім середовищем сушіння, зазвичай повітрям. Через основні відмінності в характеристиках сушіння в тонкому шарі та глибокому шарі, процес сушіння поділяється на тонкошарове сушіння та глибоке сушіння.

Сушіння в тонкому шарі відноситься до процесу сушіння сировини при якому вся сировина повністю піддається впливу повітря в постійних умовах сушіння, тобто при постійній температурі повітря та вологості. Як правило, шар зерна товщиною до 20 см (з рекомендованим співвідношенням повітря-зерно) береться як тонкий шар. Усі комерційні проточні сушарки розроблені на основі тонкошарового сушіння.

Під час сушіння в глибокому шарі вся сировина (наприклад, зерно) в сушарці не повністю піддається впливу повітря для сушіння. Умови повітря для сушіння в будь-якій точці зернової маси змінюються з часом і в будь-який час також змінюються з глибиною зернового ложа. Крім того, швидкість потоку повітря на одиницю маси зерна невелика порівняно з тонкошаровим сушінням

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

зерна. Усі сушарки періодичної дії зі статичним шаром сконструйовані за принципом глибокого шару.

Сушарка для рідкої сировини на інертних твердих частинках (також званих носіями, оскільки вони переносять матеріал під час сушіння) полягає в розпиленні рідкої сировини, такої як розчин, суспензія або м'яка паста, яка потім покриває тонким шаром поверхню інертних частинок. Ці частинки «зріджуються» або за рахунок єдиного гідродинамічного впливу гарячого повітряного потоку, або в поєднанні з механічним впливом, викликаним міксерами, вібраторами, шнековими транспортерами та іншими [5, 9]. Рідкий шар на поверхні частинок висихає за рахунок конвективного теплообміну від гарячого повітря і контактного теплообміну за рахунок відчутного тепла, накопиченого в інертних частинках при проходженні ними зони гарячого повітря. Слід зазначити, що хоча передача тепла шляхом провідності доповнює конвективний теплообмін, цей тип сушарок відноситься до категорії конвективних сушарок, оскільки теплова енергія для випаровування води забезпечується виключно потоком гарячого повітря (рис. 1.7).

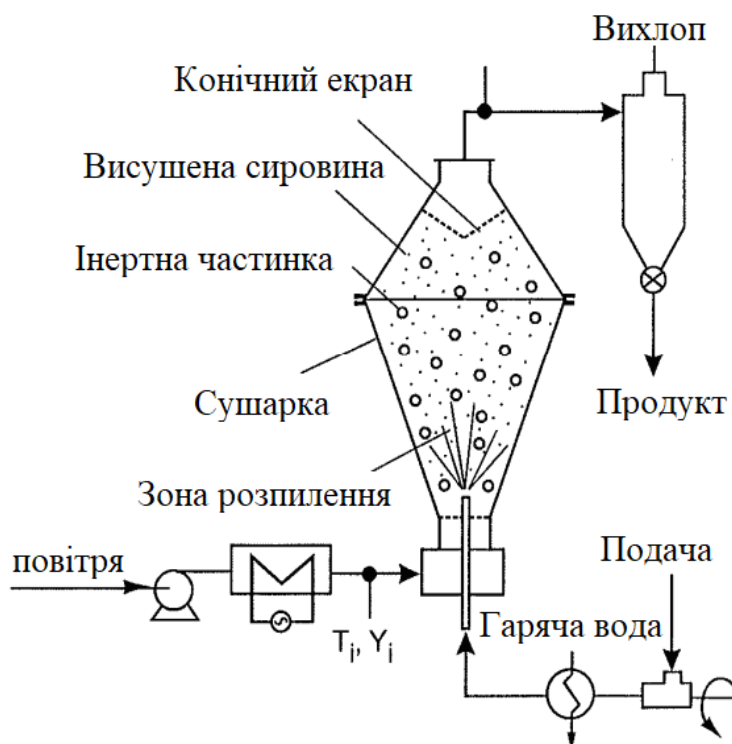


Рисунок 1.7 – Сушарка для рідкої сировини на інертних твердих частинках

Через випаровування води під час сушіння рідкий шар на поверхні частинок зрештою перетворюється на крихку оболонку, яка потім відколюється від поверхні частинок, порушена зіткненням частинка з частинкою та частинка зі стінкою виводиться з сушильної камери разом із відпрацьованим повітрям. З різних конфігурацій сушарок з інертними носіями найбільш часто досліджується шар зі струменевим виливом з інертними частинками. Тут високошвидкісний потік гарячого повітря (струмінь) приводить тверді частинки

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

в носикоподібний рух, практично у всьому обсязі конічної або конусоциліндричної сушильної камери.

Багатоступеневі сушарки являють собою комбінацію кількох одноступневих сушарок, таких як розпилювальна сушарка із зовнішнім рідинним шаром, які можна розглядати як окремі сушарки або гібридна конфігурація, така як розпилювальна сушарка з інтегрованим рідинним шаром. На рисунку 1.8 представлено схему гібридної сушарки, що складається зі звичайної розпилювальної сушарки та вбудованої сушарки з псевдозрідженим шаром, яка призначена для сушіння термочутливої сировини.

Сушарка з киплячим (псевдозрідженим) шаром) має низку переваг [4]:

- у киплячих шарах контакт твердих частинок з рідиною, що кипить, (газом або рідиною) значно посилюється в порівнянні з упакованими шарами. Така поведінка в киплячих шарах згоряння забезпечує хороший транспорт тепла всередині системи;
- хороша теплопередача між станиною та її контейнером, який може мати значну теплоємність при збереженні однорідного температурного поля;
- високі швидкості тепло- та масопередачі, завдяки хорошему контакту між частинками та газом, що сушаться;
- рівномірна температура та сипуча вологість частинок, через інтенсивне перемішування частинок у шарі;
- відмінний контроль температури та робота до найвищої температури;
- висока сушильна здатність за рахунок високого відношення маси повітря до маси продукту.

Розпилювальна сушарка спільного струму подається зверху двома форсунками високого тиску. Щоб запобігти псуванню матеріалу, обидва сопла охолоджуються двома потоками навколишнього повітря, що нагнітаються в корпус сопла.

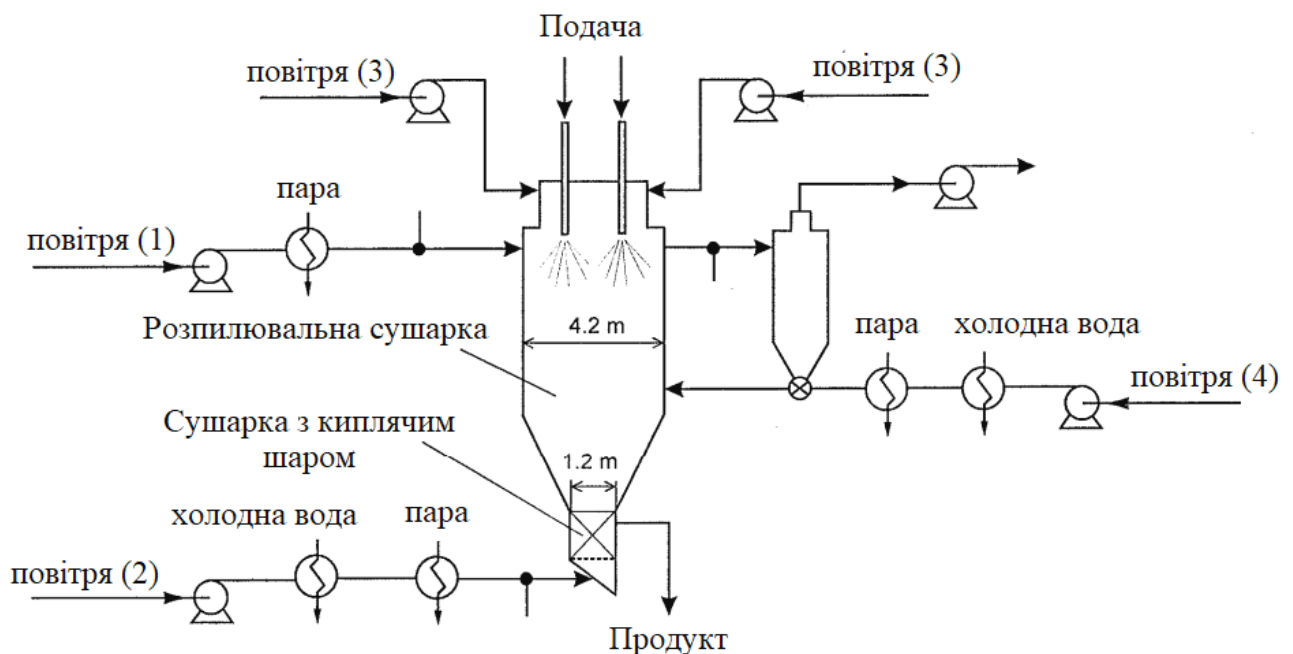


Рисунок 1.8 – Розпилювальна сушарка з вбудованим рідинним шаром

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Рідкі розпилювачі, що утворюються форсунками, осушуються спільно протікаючим потоком первинного гарячого повітря, нагрітого до необхідної температури в пароповітряному теплообміннику. Частково сухий матеріал потрапляє в сушарку з циліндричним рідинним шаром, що подається знизу з вторинним потоком гарячого повітря, що нагрівається опосередковано в пароповітряному теплообміннику. У разі надмірної вологості навколишнього повітря повітряний потік, що нагнітається в сушарку з рідинним шаром, осушується в теплообміннику шляхом охолодження холодною водою. Фракція сухих дрібнодисперсних частинок (~ 0,1 мм) захоплюється відпрацьованим повітрям в циклон, тоді як основна частина матеріалу виводиться з киплячого шару через повітряний шлюз.

Вхідне повітря надходить з двох потоків гарячого повітря, а саме з первинного повітря, що подається в розпилювальну сушарку і з вторинного повітря, що подається в сушарку з інтегрованим рідинним шаром. Таким чином, відпрацьоване повітря є сумою як повітряних потоків, так і повітря, що використовується для охолодження форсунок [5, 6, 9]. Що стосується надходження тепла, то потоками охолоджуючого повітря можна нехтувати, оскільки вони складають лише 6% від осушуючого повітря, але припадають на вологість відпрацьованого повітря. Повітряний потік для пневматичного транспортування частинок назад до гібридної сушарки в цій конфігурації незначний.

Що стосується режиму теплопередачі, то конвективні сушарки належать до групи прямих сушарок, оскільки тепло для випаровування води передається шляхом безпосереднього контакту висушеного матеріалу з потоком гарячого газу, такого як повітря, вуглекислий газ або азот, перегріта пара або димові гази від спалювання викопного палива. Зазвичай, однак, прямі осушувачі сприймаються як конвективні сушарки, де тепло зазвичай подається сумішшю повітря і продуктів згоряння палива. Такі сушарки називають сушарками прямого горіння або газовими сушарками, якщо в пальнику згорає природний газ (рис. 1.9).

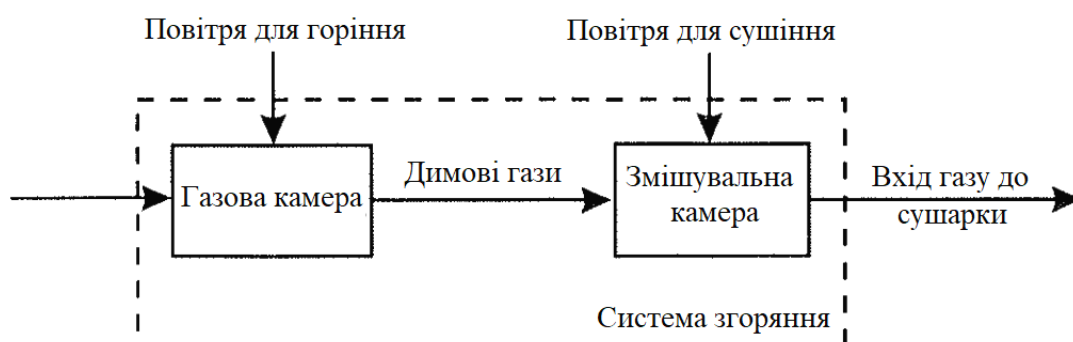


Рисунок 1.9 – Газова пневматична сушарка

Водяна пара, що утворюється у процесі згоряння підвищує вологість газу на виході, але ця додаткова вологість не є результатом сушіння, тому в основному вона не впливає на температуру газу на виході, і, отже, її можна розглядати як інертний газ. Однак, повітря для горіння доповнює повітря для сушіння в газі на виході, тому вологість на виході слід розраховувати як масу

води, що випарувалася в сушарці, над сумарною масою сушильного повітря, надлишку повітря та продуктів згоряння (N_2 та CO_2).

Отже, при виборі сушарки необхідно враховувати, серед іншого, характер роботи (безперервна або переривчаста), тиск у сушарці, конструкцію апарату (камерний, тунельний, стрічковий, барабанний, псевдозріджений, роликовий, пневматичний або вібраційний), а також масштаб виробництва. Процес сушіння пов'язаний з високою потребою в тепловій енергії. Підраховано, що на процеси сушіння витрачається до 25% промислових енергетичних ресурсів [5-7]. Таким чином, скорочення енерговитрат є пріоритетом з огляду на виснаження запасів викопного палива, забруднення навколишнього середовища, а також фінансові міркування. Результатів можна досягти за рахунок підвищення ефективності систем і самого процесу сушіння, а також за рахунок використання технологічних рішень і обладнання, які гарантують зниження потреби в енергії. Тому існує потреба в системі сушіння, яка забезпечує як високу енергоефективність, так і відмінну якість продукції. Інноваційним рішенням може бути використання теплового насоса. У звичайних сушарках повітря викидається за межі камери, викликаючи незворотну втрату енергії. Викид повітря збільшує потребу в тепловій енергії, необхідній для отримання необхідних якісних параметрів сировини. Збільшення витрат енергії призводить до збільшення витрат на продукцію.

Застосування теплового насоса дає можливість утилізувати потік відпрацьованого повітря, що виходить з камери і ентальпійний заряд, що міститься в ньому. Конденсат відводиться з камери, а безвологе повітря нагрівається і повертається в контур. Крім виходу енергії, використання теплового насоса знижує вплив процесу сушіння на навколишнє середовище за рахунок зменшення електроенергії, необхідної для роботи сушильної камери.

Використання теплового насоса може призвести до зниження потреби в енергії на 40% порівняно зі стандартною сушаркою, розрахованою на масу висушеної сировини. Широкий діапазон досягнутих температур сушіння (від 20 до 100°C) при низькій вологості повітря, що надходить в камеру, дає можливість управляти режимами сушіння по відношенню до фізико-хімічних властивостей сировини [1-4]. Це дуже важливо з точки зору енергетичної оптимізації процесу. Дослідження підтверджують, що використання теплового насоса як джерела енергії надає сприятливий колір і аромат сировині. Зниження потреби в тепловій енергії у процесі сушіння дуже важливо з утилітарної точки зору, так як дозволяє знизити витрати на виробництво.

Сушіння вимагає великих енерговитрат через високу приховану теплоту пароутворення води та низьку енергоефективність промислових сушарок. Багато енергії витрачається даремно при неефективному сушінні. Сушіння сировини дуже важлива операція у харчовій галузі через численні переваги, тобто зменшення вологості в твердих речовинах має такі переваги:

- покращує обробку твердих речовин;
- покращує використання твердої речовини як сировини;
- зменшує витрати на завантаження та транспортування;
- зменшує процеси бродіння всередині твердої речовини під час зберігання та транспортування.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння є важливою операцією в харчовій промисловості та застосовується для видалення води із сировини. Процес сушіння відбувається за допомогою впливу на матеріал нагрітого повітря в камері, яку називають сушаркою. Процес сушіння може бути досягнуто природними засобами, такими як сонячне сушіння, коли сонце забезпечує енергію, яка необхідна для видалення води з харчового продукту. Зазвичай, термін сушіння означає видалення відносно невеликої кількості вологи з твердої або майже твердої сировини шляхом випаровування.

Аналіз джерел дав змогу виявити, що у більшості сушильних операцій вода – це рідина, що випаровується, а повітря є сушильним середовищем. Сушіння – це процес одночасного тепло- і масообміну. Тепло переноситься конвекцією з навколишнього середовища до поверхонь частинок, а звідти шляхом провідності в сировину. Волога переноситься в зворотному напрямку у вигляді рідини або пари на поверхні, випаровується і переходить шляхом конвекції в навколишнє середовище. Процес сушіння і видалення вологи з продукту за допомогою підведеного до нього тепла розглядається як внутрішня маса і теплопередача (перенесення тепла і вологи всередину) і зовнішня маса і теплопередача (передача тепла і вологи з поверхні виробу).

Сушіння відбувається при випаровуванні рідини шляхом подачі тепла на вологу сировину. Рідина, що видаляється у процесі сушіння, може бути або вільною вологою (незв'язаною), або зв'язаною в структурі твердого тіла. Незв'язана волога, як правило, присутня у вигляді рідкої плівки на поверхні твердої частинки, легко випаровується, в той час як зв'язана волога може знаходитися всередині твердого матеріалу, утримуючись в мікроструктурі твердого тіла.

Зазначено, що процес сушіння пов'язаний з високою потребою в тепловій енергії. Скорочення енерговитрат є пріоритетом з огляду на виснаження запасів викопного палива, забруднення навколишнього середовища, а також фінансові міркування. Результатів можна досягти за рахунок підвищення ефективності систем і самого процесу сушіння, а також за рахунок використання технологічних рішень і обладнання, які гарантують зниження потреби в енергії. Тому існує потреба в системі сушіння, яка забезпечує як високу енергоефективність, так і відмінну якість продукції. Інноваційним рішенням може бути використання теплового насоса або комбінованих методів сушіння.

Застосування теплового насоса дає можливість утилізувати потік відпрацьованого повітря, що виходить з камери і ентальпійний заряд, що міститься в ньому. Конденсат відводиться з камери, а безвологе повітря нагрівається і повертається в контур. Крім виходу енергії, використання теплового насоса знижує вплив процесу сушіння на навколишнє середовище за рахунок зменшення електроенергії, необхідної для роботи сушильної камери.

Використання теплового насоса може призвести до зниження потреби в енергії на 40% порівняно зі стандартною сушаркою, розрахованою на масу висушеної сировини. Сушіння вимагає великих енерговитрат через високу приховану теплоту пароутворення води та низьку енергоефективність промислових сушарок. Багато енергії витрачається даремно при неефективному сушінні.

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

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ ТОМАТІВ

2.1 Оптимізація параметрів сушіння

1. Форма та розмір сировини, що підлягає сушінню. Сушіння – це процес, який відбувається на поверхні сировини протягом більшої частини часу висихання. Деякий ступінь сушіння також може відбуватися безпосередньо під поверхнею, але зазвичай процес зосереджується на видаленні води на поверхневому рівні. Коли об'єкт сушіння має великі частинки, воді в центрі частинки потрібно більше часу, щоб дістатися до поверхні і бути видаленою сухим повітрям, ніж для того, щоб вода досягла поверхні з центру більш дрібної частинки. З цієї причини необхідно регулювати час сушіння, щоб врахувати розмір частинки.

Вода переміщується із внутрішньої частини продукту на поверхню за допомогою процесу, відомого як «дифузія». Швидкість дифузії, або скільки води досягає поверхні за певний проміжок часу, залежить від розміру частинок і структури матеріалу. За нормальних умов сушіння можна зробити дуже мало, щоб прискорити швидкість дифузії. Для цього необхідно узгодити процедуру сушіння з розміром частинок і типом сировини, що сушиться.

Якщо підлягають сушінню зерна злаків, такі як рис або пшениця, більш пухкі (тобто більшого діаметру) зерна будуть сушитися довше, ніж зерна меншого діаметру, через відстань, яку вода повинна пройти від внутрішнього ядра, щоб досягти поверхні [3-8]. З двох сфер, будь-яка вода в центрі більшої частинки повинна буде пройти далі, щоб досягти поверхні, ніж у меншій. Це означає, що знадобиться більше часу, щоб вода досягла поверхні більшої частинки продукту і була видалена. Форма є ще одним важливим фактором при сушінні будь-якої сировини. Форма також важлива, коли справа доходить до отримання тепла продукту. Як відомо існує три основні форми з якими доводиться мати справу при сушінні: сфера, циліндр, пласкі плити.

Кулясті предмети – це ті, які круглі, як куля. Горох має кулясту форму, як і більшість ягід. У випадку зі сферичними предметами максимально можливий об'єм міститься в межах мінімально можливої площі поверхні при заданій вазі сировини. В результаті сферичні частинки можуть бути досить складними або повільними для висихання. Потрібен час, щоб волога у внутрішній частині сфери проникла до поверхні частинок, де буде відбуватися випаровування гарячим повітрям або іншим сушильним середовищем. У випадку зі сферичними предметами загальна площа поверхні вважається важливою у відведенні води під час сушіння.

Циліндричні об'єкти мають довжину та круглий поперечний переріз.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Чирик</i>				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						22	13
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ДонНУЕТ		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>					Кафедра ЗІДО		

Морква буде розглядатися як циліндр, навіть якщо один його кінець може бути більше в діаметрі, ніж інший кінець. Сардельки та ковбаси мають циліндричну форму, як і зерна злаків, такі як рис. Коли волога видаляється з циліндричного матеріалу, вода повинна дифундувати від центру циліндра і рухатися назовні по радіусу, щоб досягти поверхні так само, як це було у випадку зі сферичним об'єктом. Основна відмінність сушіння сферичного предмета від сушіння циліндра полягає в тому, що кінці циліндра, як правило, не вважаються дуже важливими у процесі сушіння [3-8]. Кінці являють собою відносно невелику частку площі поверхні для відведення води, якщо порівнювати з бічними сторонами циліндра. При сушінні циліндричного предмета на одиницю ваги матеріалу зазвичай припадає більша площа поверхні, ніж для сферичного предмета, тому сушіння відбувається дещо швидше з циліндрами, ніж зі сферами. Слід зазначити, що циліндри великого діаметру сохнуть довше, ніж циліндри меншого діаметру.

Пласкі пластини або плити можна розглядати як плаский шматок, який має пласку верхню та нижню поверхні та пласку поверхню навколо свого краю. Стейк або шматок плаского тіста для печива можна розглядати як плити. При сушінні вода буде втрачатися з верхньої і нижньої поверхонь. Поверхні навколо краю відіграватимуть незначну роль у відведенні води. Оскільки площа поверхні плити часто досить велика по відношенню до її товщини, сушити предмети у формі плити може бути легше, ніж сушити кулясті або циліндричні предмети. Кожна з трьох основних форм має характерний розмір, який визначає відносну швидкість сушіння. У разі сферичних об'єктів, важливий саме радіус (тобто половина діаметра). Для циліндрів найважливішим також є радіус. Для пласких пластин або плит характерний розмір становить половину товщини, оскільки вода повинна дифундувати лише від центру плити до верхньої або нижньої поверхонь плити.

2. **Склад, структура і пористість.** Щільна структура буде прагнути утримувати вологу всередині сировини більше, ніж пухка відкрита структура. Великі пори, що проникають по всій внутрішній частині виробу або матеріалу, дозволять дифузії вологи протікати з більшою швидкістю, ніж в тому випадку, коли пор дуже мало або дуже вузькі. Крохмалистий матеріал буде утримувати більше вологи, коли крохмаль желатинізується, а «крохмальна матриця» набухає поглиненою водою. Волокнистий матеріал може втрачати вологу легше, ніж менш волокнистий матеріал, через доступні шляхи для виходу вологи зсередини на поверхню. Значення складу, структури і пористості досить складні властивості, які можуть навіть змінюватися у процесі сушіння. У міру видалення води «крохмальна матриця» чогось на зразок гідратованого рису може зруйнуватися сама по собі і змінити дифузійні властивості матеріалу. Температура також може змінювати крохмаль з неклеїстеризованої форми на желатинізовану і впливати на процес сушіння.

3. **Вміст вологи.** Одним з найбільш очевидних факторів, що впливають на сушіння є фактична вологість самої сировини. У процесі сушіння отримується кінцева цільова вологість до якої необхідно зменшити вологість продукту. Якщо початкова вологість вихідного матеріалу висока то доведеться видаляти більше вологи в порівнянні з випадками, коли її вологість дещо нижча. Це

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

займе додатковий час сушіння, що необхідно враховувати при встановленні умов експлуатації сушарки. При налаштуванні сушарки початкова вологість і кількість продукту, що переробляється за одиницю часу (наприклад, кілограми або «кг» продукту при заданому вмісті вологи, що надходить в сушарку щогодини) є ключовими змінними, які слід враховувати.

4. Характеристики поверхні продукту. Характеристики поверхні важливі з кількох точок зору. По-перше, слід врахувати, що в багатьох випадках, наприклад, у випадку з ягодами, поверхня призначена для утримання вологи. Якщо сушити ягоди то необхідно розуміти, що природа задумала ягоду для захисту насіння, щоб забезпечити розмноження рослини [3, 6, 12]. Щоб зберегти запас вологи навколо насіння поверхня ягоди часто досить жорстка або воскоподібна, або іншим чином утворює бар'єр для втрати вологи. Тому необхідно вжити заходів для подолання цього бар'єру втрати вологи. Наприклад, нарізати ягоди так, щоб сушильне середовище (тобто повітря) досягло м'ясистої вологої частини ягоди або розірвати шкірку ягоди, щоб забезпечити точки через які волога могла б виходити під час сушіння. Якщо поверхня сировини досить шорстка і з ямками це може дозволити волозі краще виходити, ніж якби поверхня була відносно гладкою.

5. Питома площа поверхні. Питома площа поверхні – це показник площі поверхні, присутньої в одиниці ваги матеріалу. Він може вимірюватися в одиницях квадратних сантиметрів на грам або квадратних метрах на кілограм (м/кг). Вказує на те, що сушіння є поверхневим явищем і чим більше поверхні доступно для втрати вологи, тим швидше може протікати процес сушіння. Наприклад, коли відварюється картопля то її нарізають на менші шматочки, щоб вона швидше приготувалася. Процес різання створює більшу площу поверхні для проникнення тепла, ніж була доступна до того, як картопля була нарізана. Нарізка також зменшує відстань, яку має пройти тепло, щоб дістатися до центру шматка картоплі. Те ж саме і з сушінням. Якщо є менші шматки то маємо більшу площу поверхні з якої може виходити волога. На додаток до цього маємо зменшену товщину шматків, що зменшує час, який необхідний для того, щоб волога з центру матеріалу досягла поверхні та випарувалася повітрям, що висихає.

6. Питома теплова ємність. Вплив питомої теплоємності на сушіння може бути не таким очевидним, як деякі інші фактори. У більшості випадків, коли матеріал вперше заноситься в сушарку його температуру необхідно підняти до певного рівня, щоб посилити процес сушіння. Коли вводиться продукт у сушарку, може знадобитися більше часу, щоб отримати продукти з більшою питомою теплоємністю до бажаної температури, ніж для продуктів з нижчими значеннями, що може подовжити час необхідний для сушіння.

7. Сортові відмінності. Не всі сорти тієї чи іншої сировини мають ідентичні властивості. Наприклад, розміри зерен рису будуть варіюватися в залежності від того чи є рис довгозернистим або короткозернистим сортом. Характеристики крохмалю також можуть відрізнятися в різних сортах рису та інших крохмалистих харчових продуктах, таких як картопля. Ці відмінності вплинуть на те, як вода утримується всередині продукту, що в кінцевому

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

підсумку призведе до відмінностей між сушильними властивостями двох сортів однієї і тієї ж рослини.

8. Типи сушарок. Всі матеріали мають дещо різні характеристики сушіння, які вимагають особливого розгляду. Сушіння пластівців петрушки значно відрізняється від сушіння кукурудзи. Сушіння молочної сироватки для відновлення її твердих компонентів значно відрізняється від сушіння помідорів на сонці. Сушіння картоплі для отримання картопляних пластівців відрізняється від сушіння тютюнового листа в печі. Існує безліч видів сушильних машин від виробників для задоволення потреб того чи іншого товару. Якщо сушарка використовується для сушіння пластівців петрушки не варто використовувати її для сушіння картопляних пластівців. Якщо використовувати сушарку не для відповідної сировини для якої вона була призначена вона не працюватиме належним чином, а кінцевий продукт не буде тієї якості, яким має бути.

9. Конструктивні особливості сушарки. Подібно до того, як фактичний тип сушарки може впливати на сушіння продукту, функції, які включені в конструкцію сушарки, також можуть мати вплив. Наприклад, у деяких сушарках для транспортування використовується рухомий ремінь із дротяної сітки продукту через сушильну камеру [3, 8]. При такому розташуванні частинки продукту укладаються один на одного і через шар матеріалу пропускається повітря для видалення вологи. Щоб подолати ефект поверхневого контакту між частинками їжі та створити кращий загальний контакт сушильного повітря та поверхні продукту, деякі сушарки можуть бути оснащені вібраційним механізмом, який переміщує частинки їжі, коли вони проходять через сушарку. Коли частинки їжі відскакують вгору і падають назад на віброуючу поверхню сушарки, вони відчують тісніший контакт із сушильним повітрям, ніж у плоскій платформі на рухомому конвеєрі.

10. Температура повітря. Більшість сушильних систем у харчовій промисловості використовують гаряче повітря як сушильне середовище. У деяких випадках повітря може нагріватися за рахунок пропускання його через електричні нагрівальні елементи. Незалежно від джерела тепла, температура повітря є ключовим фактором при сушінні будь-якого матеріалу. Чим вище температура повітря, тим більше буде його водоутримуюча здатність, що в свою чергу означає, що його здатність видалити воду з продукту буде більше, ніж якби використовувалося більш прохолодне повітря. Хоча може виникнути спокуса використовувати максимально можливу температуру повітря в конкретній сушарці, у цьому відношенні слід бути гранично обережним. Перш за все, деякі продукти дуже чутливі до нагрівання і їх якість значно знижується, якщо вони піддаються впливу надмірних температур. Якщо температура занадто висока, продукт може підгоріти або підсмажитися. З цієї причини такий продукт, як петрушка, можна сушити тільки при температурі близькій до 60°C. Хоча при такій температурі може знадобитися багато часу, щоб видалити вологу з гілочок петрушки, все, що перевищує цю межу, серйозно зашкодить якості сушених пластівців петрушки.

Якщо вологий матеріал піддається занадто сильному нагріванню його зовнішня поверхня може стати дуже сухою за короткий проміжок часу і

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

створити оболонку або шар скоринки навколо матеріалу. Ця загартована поверхня затримує вологу, яка була в центрі продукту і запобігатиме її досягненню зовнішньої поверхні частинки де вона зазвичай випаровується. Так як волога не може вийти то вона залишиться всередині «загартованого корпусу» шматка матеріалу. Часто зовнішня оболонка залишається недоторканою, але внутрішня структура частинки руйнується через вплив вологи всередині неї. Коли споживач переходить до використання продукту, перше, що він помічає, це те, що продукт функціонує не так, як він очікував, і що його текстура кардинально змінилася порівняно зі звичайною текстурою. Необхідно подбати про те, щоб застосовувати тепло зі швидкістю, яка не призводить до затвердіння виробу, якщо тільки насправді не бажаний певний ступінь затвердіння корпусу.

11. Час зберігання. Так само, як температура сушильного повітря може впливати на якість кінцевого продукту, так само може вплинути тривалість часу, протягом якого продукт піддається впливу гарячого повітря. Температура і час взаємопов'язані в сушінні в основному однаково. Для сушіння матеріалу при більш високій температурі повинно йти менше часу, ніж при більш низькій. Потрібен час, щоб волога перемістилася від центру частинки продукту до зовнішньої поверхні, де вона може бути випарована гарячим повітрям у сушарці. Необхідно збалансувати час перебування в сушарці при певній температурі зі здатністю вологи дифундувати з харчового матеріалу. У випадку з петрушкою при температурі 60°C потрібно кілька годин, щоб висушити її до бажаного кінцевого рівня вологості. Іншим виробам може знадобитися лише 20 або 30 хвилин для висихання за певних умов сушіння.

12. Відносна вологість повітря – це міра того, скільки вологи повітря утримує в порівнянні з тим скільки вологи воно могло б вмістити, якби було насичене вологою в цих умовах. Об'ємна витрата повітря – це міра кількості повітря, що подається в сушильну камеру сушарки за будь-який заданий період часу і виражається в одиницях об'єму за одиницю часу. Ними можна керувати, регулюючи швидкість вентилятора на сушарці, щоб подавати більший або менший об'єм повітря за заданий проміжок часу. Об'ємні витрати повітря є альтернативним способом доставки більшої кількості тепла в сушарку. У багатьох сушарках ви можете або збільшити температуру повітря, щоб ввести більше тепла або можна збільшити обсяг повітря, що проходить через сушарку. Або ви можете зробити комбінацію обох [10-14]. Регулювання об'ємної швидкості повітряного потоку особливо корисно при роботі з матеріалами, які чутливі до нагрівання. Наприклад, якщо розглянути сушіння петрушки то необхідно більше тепла, щоб висушити партію петрушки, але не можемо підвищити температуру через потенційне теплове пошкодження петрушки. Збільшуючи об'єм повітря, яке продувається через сушарку можна досягти майже того ж і збільшити сушильну здатність сушарки.

13. Лінійна швидкість повітря. Лінійна швидкість повітря безпосередньо пов'язана з об'ємною швидкістю повітряного потоку. Це швидкість з якою повітря рухається через сушарку і виражається в метрах на секунду. Оскільки більшість сушарок мають фіксовані розміри (тобто розмір сушарки не змінюється), площа поперечного перерізу сушарки постійна. Якщо збільшите

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

об'єм повітря, що продувається через сушарку, її лінійна швидкість (тобто швидкість) пропорційно зростає. Якщо зменшити об'ємну витрату повітря, то його швидкість зменшиться.

Основний ефект лінійної швидкості повітря в сушарці полягає в тому, що якщо вона стає занадто великою вона може мати достатню силу, щоб підняти шматки матеріалу, що сушиться, і обдути їх усередині сушарки. Це може призвести не тільки до того, що втрачений продукт буде видуватися прямо з сушарки, але й призвести до нерівномірного сушіння. Якщо матеріал розподілити в шарі рівномірної товщини по всій сушильній поверхні, повітря може продути отвори в цьому шарі матеріалу. На рисунку 2.1 представлено фактори, що впливають на сушіння, а також різні хімічні та фізичні характеристики сушених помідорів правильне дотримання яких сприятиме оптимізації параметрів сушіння томатів.

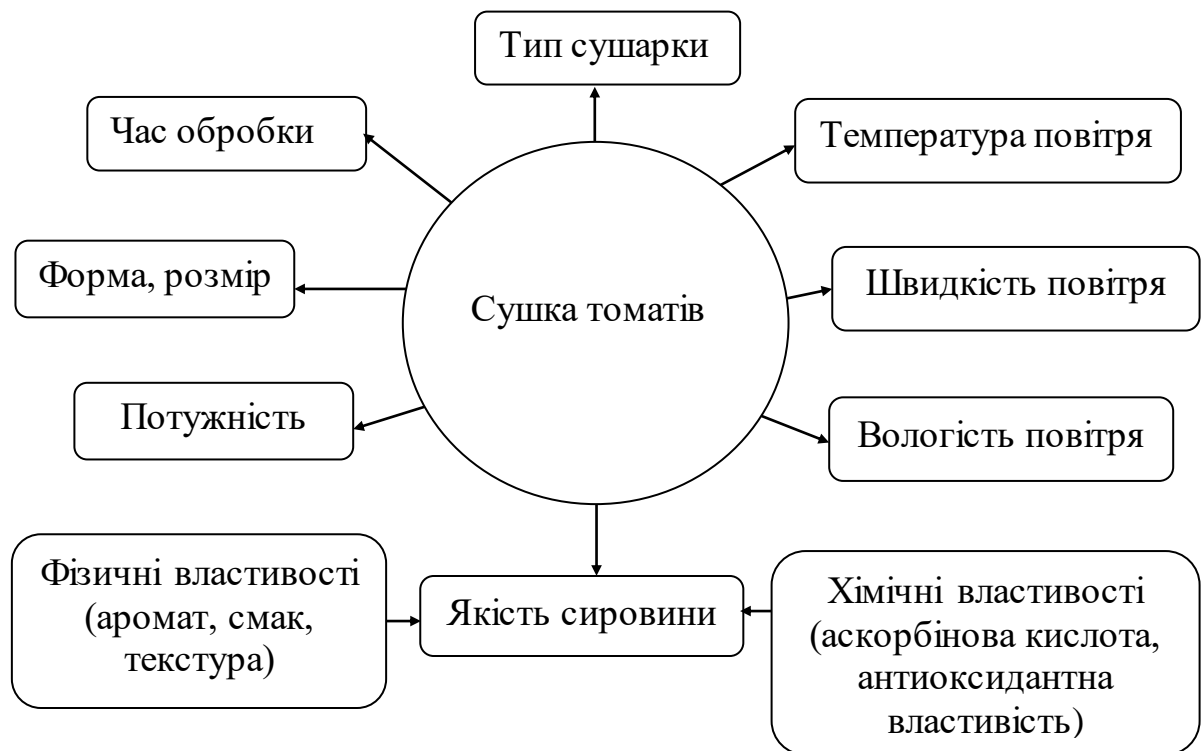


Рисунок 2.1 – Оптимізація параметрів сушіння томатів

На основі вище зазначеного можна вважати, що на якість сушених помідорів впливають кілька факторів, такі як зовнішні умови навколишнього середовища, тип сушарки, попередня обробка та властивості зразків, такі як сорт, зрілість та форма. Форма зразків, що сушаться, також впливає на час, необхідний для сушіння, і на якість сушених помідорів, четвертинки сушилися на 8,3% швидше, ніж половинки, також четвертинки були схожі на свіжі зразки за значеннями L, a, b і a, ніж половинки [10]. На швидкість висихання томатної пасти впливає початковий вміст твердої речовини в пасті, не рахуючи зовнішніх умов сушіння. Найчастіше для виробництва порошку використовується процес сушіння розпиленням, оскільки він забезпечує стабільний продукт, а також є відносно економічним.

2.2 Удосконалення сушарки на основі поєднання інфрачервоної та конвективної технології

Сушка є одним з найдавніших методів збереження продуктів. Концептуально сушіння зменшує вологість харчових продуктів з двох причин: щоб пригнічувати ріст бактерій і мікроорганізмів (ферментів) і, отже, зберігати продукти, а також зменшувати вагу та об'єм сировини для дешевшого транспортування та зручнішого зберігання. Хоча традиційні процеси дегідратації, включаючи сушіння на сонці, сонячну сушку та сублімаційну сушку, широко використовуються в харчовій промисловості, вони мають недоліки з точки зору низької швидкості сушіння, що призводить до низької енергоефективності та втрати поживних речовин готового продукту. Наприклад, сушіння гарячим повітрям широко використовується завдяки своїй простій механічній структурі та економічній ефективності. Проте, характеризується низькою тепловою ефективністю та досить тривалим часом нагрівання, що призводить до значної втрати ефективних компонентів та зниження якості сушіння. Проблеми можна значно вирішити при розробці системи інфрачервоного сушіння в поєднанні з тепловим насосом, що дозволить знизити температуру сушіння та прискорити перенесення маси. Або застосуванням комбінованих методів сушіння, наприклад, інфрачервоного та конвективного сушіння, що сприятиме відносно вищій якості кінцевого продукту.

Серед різних технологій сушіння інфрачервоним випромінюванням є методом електромагнітного випромінювання із швидким нагріванням і високими можливостями теплопередачі. Інфрачервона сушка заснована на поглинанні електромагнітних хвиль, які вібрують складові молекули харчових матеріалів на частоті 60000-150000 МГц, що призводить до міжмолекулярного тертя зі швидким внутрішнім нагріванням і тим самим випаровуванням води, що полегшує процес сушіння [10]. Важливим параметром для інфрачервоної сушки помідорів є інфрачервона потужність, швидкість повітря і товщина висушеної сировини (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Інфрачервона область випромінювання

Інфрачервона технологія в харчовій промисловості в основному пов'язана з опроміненням фруктів і овочів. Сушка продуктів за допомогою інфрачервоного випромінювання розглядаються як сушарки 4-го покоління.

Основна перевага цієї технології схожа на мікрохвильову обробку, яка дозволяє прискорити процес сушіння. Крім того, інфрачервоне опромінення, будучи променистим режимом нагрівання є більш енергоефективним. Класифікація генераторів ІЧ-випромінювання наведена на рисунку 2.3.

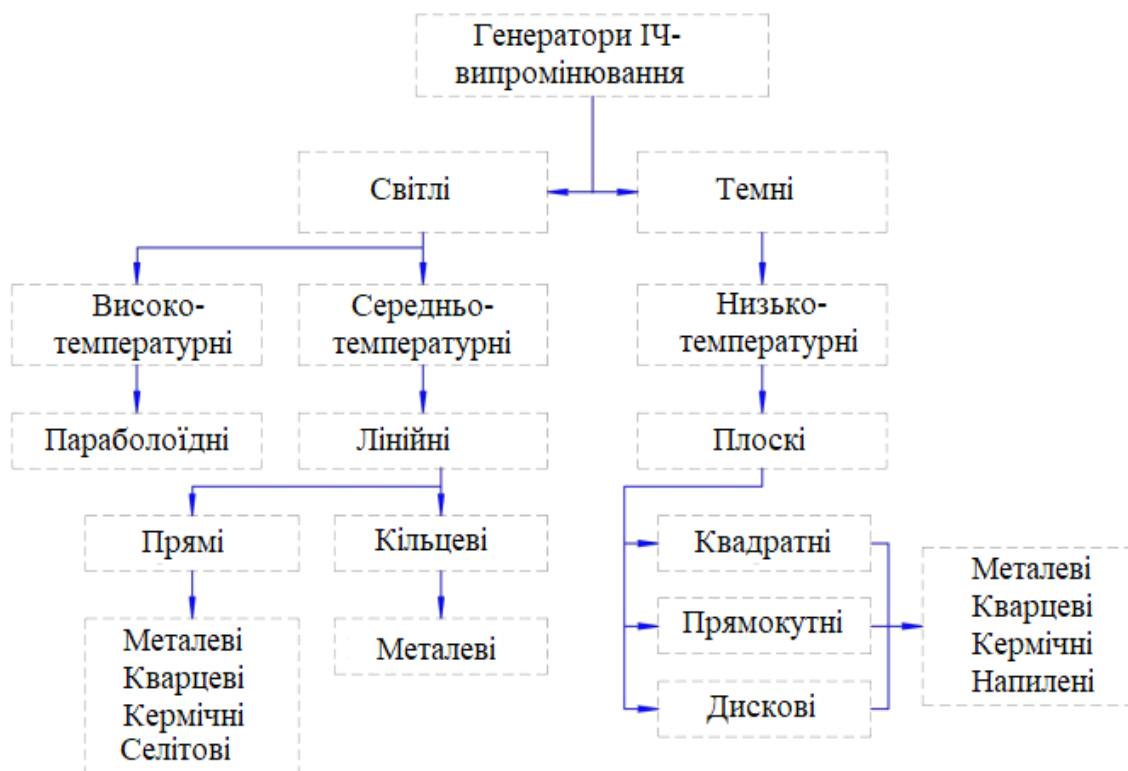


Рисунок 2.3 – Класифікація генераторів ІЧ-випромінювання

У процесі сушки томатів спостерігається наявність початкового періоду адаптації зі збільшенням швидкості сушіння за яким слідує період спадання. Далі два періоди зниження швидкості та лише один період висихання. На час сушіння впливає як інтенсивність потужності так і швидкість руху повітря в сушильній камері. Встановлено, що час сушіння зменшується зі збільшенням потужності, що пояснюється підвищенням температури за рахунок більшого поглинання радіації на одиницю площі тканини помідора. З іншого боку, зі збільшенням швидкості руху повітря спостерігається протилежна тенденція, яка пов'язана з індукцією охолоджуючого ефекту в навколишній тканині при сушінні, що зменшує ефективний температурний градієнт. Також впливає товщина зрізу, температура на споживання енергії та час сушіння [10-15]. Витрата енергії зменшується зі збільшенням як температури, так і товщини, а час сушіння зменшується зі збільшенням температури і зменшенням товщини:

- ефективна дифузійна здатність зростає зі збільшенням температури і потужності, в той час як зниження спостерігається зі збільшенням товщини;
- подібно до сушіння в мікрохвильовій печі вміст лікопіну в висушеному продукті збільшується, тоді як аскорбінова кислота та b-каротин зменшуються при сушінні;
- взаємодія між швидкістю та щільністю потужності суттєво впливає на усадку, тоді як вплив на коефіцієнт регідрації є незначним;

– колір висушеної сировини близький до свіжих з більш низьким значенням b . Інфрачервона техніка в основному використовується в поєднанні з іншими методами сушіння, а не одиничним використанням цього методу.

Конвекція повітря та теплопровідність використовуються в сушінні гарячим повітрям як сушильне середовище для проведення теплообміну. Незважаючи на те, що обладнання для сушіння гарячим повітрям має просту конструкцію і коштує недорого, тепло має передаватися від поверхні матеріалу до його внутрішньої речовини за допомогою теплопровідності. В результаті час сушіння тривалий, поживні компоненти сильно окислюються, а якість страждає. Інфрачервона сушка працює шляхом перетворення частини енергії в непостійну енергію теплового руху молекул, яка нагріває матеріал і видаляє вологу для завершення процесу сушіння. Поєднання інфрачервоного та конвективного сушіння підвищить ефективність сушіння за рахунок використання можливостей кожної технології [10, 11, 12]. Однак, швидке випаровування вологи з поверхні сировини під час сушіння може призвести до затвердіння поверхні та запобігти випаровуванню води на етапі сушіння. Висока відносна вологість повітря на початковому етапі сушіння призводить до швидкого підвищення внутрішньої температури матеріалу. Як тільки відносна вологість повітря в навколишньому середовищі знижується, швидкість сушіння збільшується і можна уникнути проблеми утворення на поверхні скоринки від швидкого висихання.

Сушка вважається однією з найбільш енерговитратних операцій в харчовій промисловості. Врахування енергії, яка споживана під час сушіння є не менш важливою, ніж якість кінцевого продукту при виборі конкретного методу сушіння для виробництва продукту економічно обґрунтованим способом. Сушильна машина з тепловим насосом ефективна для зниження споживання енергії. Таким чином, інтеграція інфрачервоної сушки з технологією гарячого повітря є доцільним підходом у технології сушіння томатів. Комплексне поєднання двох технологій сприятиме досягненню ефективного зневоднення зі значною економією енергії. Тому поєднання інфрачервоної сушки із конвективною забезпечить споживання меншої кількості енергії під час сушіння помідорів.

Споживання тепла у процесі сушіння складається з трьох компонентів: споживання тепла перед нагріванням, випаровування внутрішньої вологи та втрати тепла в процесі сушіння.

1. Видалення вологи під час сушіння. Обладнання переробляє 15 кг томатів за партію, починаючи з початкової вологості основи 65% і прагне до кінцевої вологості 10%. Розрахунок відведення вологи має вигляд рівняння:

$$W_p = m_1(U_1 - U_2) / (1 - U_2)$$

де W_p – волога, що виділяється у процесі сушіння, кг;

m_1 – маса сировини перед сушінням, кг;

U_1 – початкова вологість у вологому стані, 65%;

U_2 – кінцева вологість висушеної сировини на вологій основі, 10%.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Споживання тепла томатами перед нагріванням. Враховуючи високий вміст води в сировині, питома теплоємність води використовується для розрахунку теплоти попереднього нагрівання. Припускаючи, що температура перед сушінням становить 25°C і після сушіння 60°C, споживання тепла попереднього нагрівання (Q_1) розраховується як рівняння:

$$Q_1 = m_1 C (T_2 - T_1)$$

де Q_1 – споживання тепла до нагрівання, кДж;
 C – питома теплоємність води, кДж/кг·°C;
 T_1 – початкова температура томатів, 25°C;
 T_2 – кінцева температура сушеної сировини, 60°C.

3. Теплота, що витрачається при випаровуванні води в томатах обчислюється як рівняння:

$$Q_2 = W_p \lambda_w$$

де Q_2 – витрата тепла шляхом випаровування внутрішньої води, кДж;
 λ_w – прихована теплота пароутворення води, кДж/кг.

4. Втрати тепла у процесі сушіння. Враховуючи коливання температури, втрати тепла відбуваються через труби та сушильну камеру. Припускаючи, що ці втрати становлять 20% від загальної теплової енергії використаної при сушінні, втрати тепла у процесі сушіння обчислюються у вигляді рівняння:

$$Q_3 = (Q_1 + Q_2) \times 20\%$$

де Q_3 – втрати тепла у процесі сушіння, кДж.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Запропоновано комбіноване інфрачервоне та гаряче повітряне сушильне обладнання на основі контролю температури та вологості для сушіння томатів з метою підвищення ефективності та результативності сушіння. У процесі сушіння необхідно точно контролювати температуру (°C), вологість (%) і швидкість повітряного потоку (м/с). Інфрачервоне комбіноване сушильне обладнання складається з таких компонентів: комбінованого інфрачервоного та гарячого осушувального пристрою, заснованого на контролі температури та вологості. Основними компонентами сушильного обладнання є сушильна камера, зволожувач, нагрівач і система циркуляції гарячого повітря. Принципова схема обладнання, що використовується для пристрою інфрачервоного комбінованого сушіння томатів наведена на рисунку 2.4.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

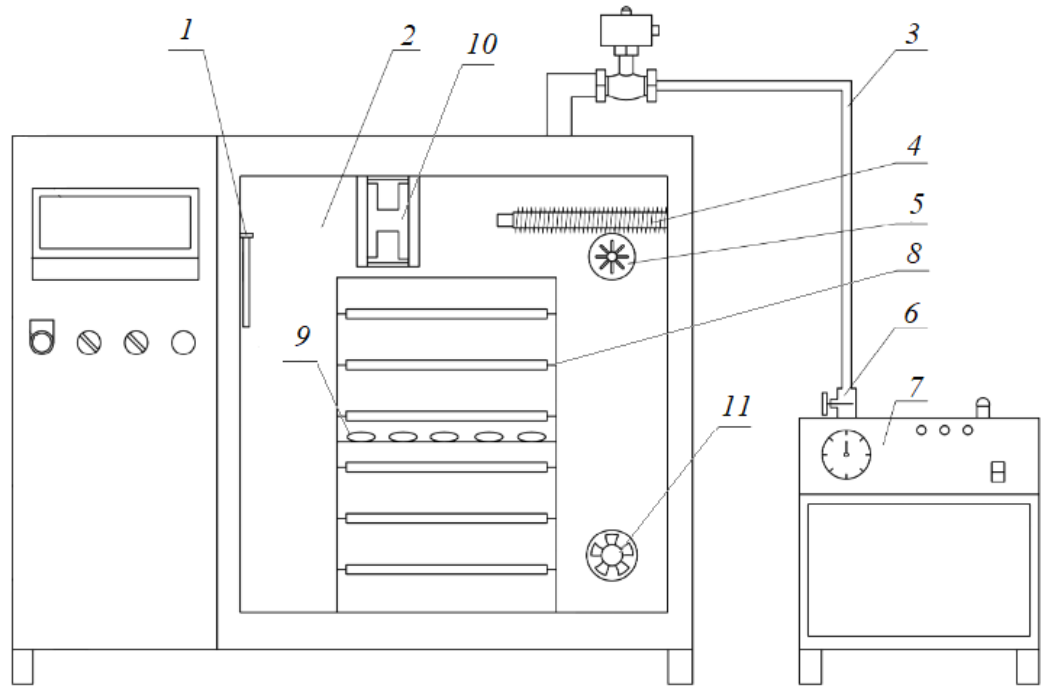


Рисунок 2.4 – Принципові схема комбінованого інфрачервоного та конвективного нагрівання

На рисунку 2.4 позначено основні компоненти системи: 1 – датчик температури і вологості, 2 – сушильна камера, 3 – труба для зволоження, 4 – труба електричного нагрівання, 5 – повітрязабірник, 6 – паровий клапан, 7 – парогенератор, 8 – інфрачервона нагрівальна пластина, 9 – сировина (томати), 10 – вентилятор 1, 11 – вентилятор 2.

Удосконалений пристрій для сушіння томатів містить нагрівальну панель інфрачервоного випромінювання із вуглецевого волокна, що має надійні ізоляційні властивості (рис. 2.5). Панель ефективно перетворює електричну енергію безпосередньо в енергію випромінювання [11-16]. Інфрачервона нагрівальна пластина гарантує високу ефективність нагріву, проста конструкція, має мінімальну відстань між випромінюваннями.

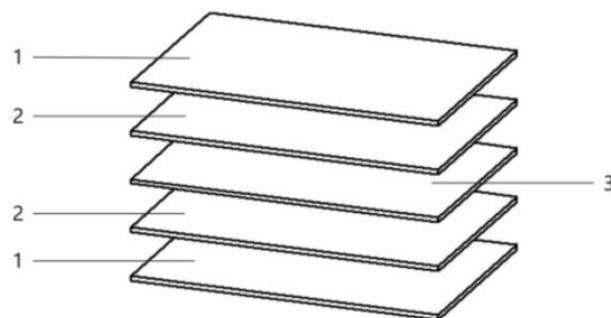


Рисунок 2.5 – Схема інфрачервона нагрівальної пластини

На рисунку 2.5 представлено: 1 – верхній шар матеріалу, 2 – нижній шар матеріалу, 3 – нагрівальний шар.

Для рівномірності випромінювання та ефективного нагріву пристрій оснащений п'ятьма рівномірно розташованими шарами інфрачервоних панелей, що перемежуються чотирма шарами блоків зберігання матеріалу. Потужність кожної інфрачервоної пластини встановлена на рівні 0,30 кВт, а розміри нагрівальної пластини з інфрачервоним випромінюванням з вуглецевого волокна становлять 500 мм×300 мм. Таке розташування оптимізовано для забезпечення рівномірного розподілу тепла та ефективного нагрівання томатів.

Сушильна камера обладнана блоком зберігання сировини, інфрачервоними нагрівальними панелями з вуглецевого волокна та блоком моніторингу даних. Симетричні піддони, які розташовані між двома бічними стінками камери служать основою для лотків для зберігання сировини. Інфрачервоні нагрівальні панелі з вуглецевого волокна розташовані як над, так і під лотком, забезпечуючи рівномірний та ефективний нагрів томатів. Блок моніторингу даних оснащений датчиками температури та вологості, а також датчиком для вимірювання внутрішньої температури матеріалу. У нижній частині камери датчики температури та вологості розташовані між двома сусідніми лотками.

Конвективне обладнання часто мають електричні нагрівальні трубки завдяки їх відмінній ефективності, невеликим розмірам, невеликій вазі, довговічності, швидкому нагріванню та низькій вартості. Щоб ефективно уникнути проблеми з тим, що вентилятор знаходиться занадто близько до джерела тепла, що може пошкодити циркуляційний вентилятор, трубка електричного нагрівання розташована перед входом повітря у верхньому правому куті за допомогою гвинтів [11, 12, 16]. Між нагрівальною і сушильною камерами проходить лінія подачі повітря, яка запобігає пошкодженню сировини високими температурами, що виробляються трубою опалення. Одинарна ребриста нагрівальна трубка з металевим радіатором на її поверхні, що розширило зону нагріву і підвищило ефективність теплопередачі, була підібрана виходячи з розмірів сушильного пристрою.

Блок моніторингу даних виконує аналіз температури та вологості в камері у режимі реального часу. Дані моніторингу в сушильній камері відображаються в режимі реального часу на сенсорному екрані взаємодії людини з комп'ютером, що дозволяє оператору приймати обґрунтовані рішення та за необхідності регулювати режими. Після активації сушильний апарат ініціює режим нагріву через інтерактивний інтерфейс «людина-машина». Цей процес активує електричну нагрівальну пластину із інфрачервоним випромінюванням вуглецевого волокна та парогенератор, що дозволяє регулювати температуру та вологість у сушильному приміщенні [11-15]. У сушильній камері встановлені системи контролю температури і вологості в режимі реального часу, а блок управління містить контролер і сенсорний екран. Контролер встановлений на лівій стороні корпусу, електрично пов'язаний з датчиками температури та вологості, внутрішнім датчиком температури матеріалу, зовнішнім вентилятором та циркуляційним вентилятором. Сенсорна панель людино-машинного інтерфейсу розташована на передній стороні корпусу, над лівим входом для обладнання, відображаючи дані моніторингу в режимі реального

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

часу та керуючи етапами сушіння. Сенсорний екран також електрично підключений до контролера.

Датчик температури РТ100 використовувався для вимірювання температури в сушильній камері під час процесу сушіння. Це було пов'язано з тим, що температура сушіння має бути регульованою, що запобігає погіршенню якості, яке виникає в результаті сушіння при високих температурах. Датчиком вологості обрано OMEGA HX71. Висока вологість призводить до того, що поверхнева волога випаровувалася в сушильну камеру під час ранньої фази сушіння, що в свою чергу призвело до постійного підвищення вологості в сушильній камері. Коли відносна вологість повітря перевищуватиме заданий рівень спрацюватиме витяжний вентилятор, який виштовхував вологість назовні. Витяжний вентилятор можна відключати, а зволожувач включити, коли показання датчика вологості будуть знижуватися нижче заданого рівня.

На основі вище зазначеного можна вважати, що сушіння – це процес, який відбувається на поверхні сировини протягом більшої частини часу висихання. Деякий ступінь сушіння також може відбуватися безпосередньо під поверхнею, але зазвичай процес зосереджується на видаленні води на поверхневому рівні. Коли об'єкт сушіння має великі частинки, воді в центрі частинки потрібно більше часу, щоб дістатися до поверхні і бути видаленою сухим повітрям, ніж для того, щоб вода досягла поверхні з центру більш дрібної частинки. З цієї причини необхідно регулювати час сушіння, щоб врахувати розмір частинки.

Зазначено, що на якість сушених помідорів впливають низка факторів, таких як зовнішні умови навколишнього середовища, тип сушарки, попередня обробка та властивості зразків, такі як сорт, зрілість та форма. Форма зразків, що сушаться, також впливає на час, необхідний для сушіння і на якість сушених помідорів. Запропоновано засоби оптимізації параметрів сушіння томатів. Вважається, за доцільне комплексне поєднання двох технологій сушіння томатів, що сприятиме досягненню ефективного зневоднення томатів, а саме поєднання інфрачервоної сушки із конвективним сушінням.

Запропоновано комбіноване інфрачервоне та гаряче повітряне сушильне обладнання на основі контролю температури та вологості для сушіння томатів з метою підвищення ефективності та результативності сушіння. Датчик температури РТ100 використовувався для вимірювання температури в сушильній камері під час процесу сушіння. Температура сушіння має бути регульованою, що запобігає погіршенню якості, яке виникає в результаті сушіння при високих температурах. Датчиком вологості обрано OMEGA HX71 для вимірювання відносної вологості повітря в сушильній камері під час сушіння томатів. Висока вологість призводить до того, що поверхнева волога випаровувалася в сушильну камеру під час ранньої фази сушіння, що в свою чергу призвело до постійного підвищення вологості в сушильній камері. Коли відносна вологість повітря перевищуватиме заданий рівень спрацюватиме витяжний вентилятор, який виштовхуватиме вологість назовні. Витяжний вентилятор можна відключати, а зволожувач включити, коли показання датчика вологості будуть знижуватися нижче заданого рівня.

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

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Фізичні характеристики сушених томатів

Томат є другим за величиною культивованим овочем після картоплі. Томати є багаторічними і культивується в усьому світі. Це один з найпопулярніших овочів завдяки своїм численним перевагам для здоров'я та асортименту продуктів, який доступний на ринку. Споживання томатів пов'язане зі зниженням ризику раку, серцево-судинних та хронічних захворювань [10-14]. Результати показують, що вживання томатів позитивно впливає на покращення здоров'я шкіри, кісток та мозку. Томати мають високий вміст вологи із середнім початковим вмістом вологи близько 90% або більше. Такий високий вміст вологи робить його сприйнятливим до псування після збору врожаю, проте сушіння помідорів є корисним для збільшення терміну зберігання цього швидкопсувного продукту.

Мета сушіння не обмежується запобіганням псуванню та збільшенню терміну зберігання. Сушіння зменшує вагу та об'єм вантажу, що покращує обробку та зменшує економічні витрати, які пов'язані з транспортуванням (рис. 3.1). В'ялені помідори застосовуються на різних етапах переробки кетчупів, соусів, консервованих продуктів, напоїв тощо. У кулінарній промисловості в'ялені помідори служать начинкою для різних страв. Застосування зневоднення до відходів, що утворюються в галузі переробки томатів, також дає такі ж перспективні продукти, як і справжні помідори.



Рисунок 3.1 – Сушені томати

Сушені продукти, виготовлені з томатів і побічних продуктів переробки, включають прями сушені помідори (половинки, скибочки, четвертинки), концентрати та порошок. Томатний порошок займає лідируючі позиції на ринку з високими вимогами. Для виробництва порошку були впроваджені

ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Чирик		
Перевір.		Цвіркун		
Н. Контр.		Омельченко		
Затверд.		Хорольський		
Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості				
		Літ.	Арк.	Аркушів
			35	6
ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО				

різноманітні процеси сушіння, такі як сушіння розпиленням, сушіння литою стрічкою, сушіння барабаном, сушіння пінопластовим матом тощо. Збереження поживних речовин, особливо вмісту лікопіну, зміни кольору, властивостей відновлення, окислювальної стабільності, антиоксидантної активності, сенсорних аспектів висушених продуктів є проблемою під час сушіння помідорів.

1. Колір. Показник є першою сприйнятою споживачем характеристикою харчового продукту. Проте сировина може легко змінити колір. Сушені помідори мають властивість темніти і втрачати яскравість. Зі збільшенням температури різниця в кольорі збільшується. Сушіння в духовці спричиняє більше змін у висушеній сировині помідорів. Для мікрохвильового та інфрачервоного сушіння зміна цих значень збільшується зі збільшенням потужності мікрохвиль та потужності інфрачервоного випромінювання [10]. Сонячна сушка показала найменшу зміну кольору, оскільки процес проводився при відносно низьких температурах. Інфрачервона сушка також була ефективною завдяки мінімальній зміні кольору. Крім того, попередня обробка є очевидною, щоб мінімізувати зміну кольору.

Колір є ще одним фізичним параметром на який впливає сушіння гарячим повітрям, висока температура призводить до неферментативного потемніння. Яскравість зразків зменшується зі збільшенням впливу заданої температури, а загальна зміна кольору виявляється зростаючою з підвищенням температури. Сполука, що сприяє свіжому смаку помідорів може бути втраченою при сушінні. Попередня обробка, така як бланшування, зменшує втрати загального вмісту фенолів та каротинів. Замість підвищення температури для скорочення часу сушіння при погіршенні якості, попередня обробка лужним етилолеатом скоротила час сушіння на 8,45 до 12,05% при різних температурах [10, 11, 18]. Ще одним способом поліпшення якості висушеного продукту є використання інших методів в комплексі з сушінням гарячим повітрям. Сушіння за допомогою ультразвуку корисне для скорочення часу висихання та кращої профілактики вітаміну Е. Аналогічним чином, обертання лотка під час сушіння виявилось корисним для мінімізації втрат загального вмісту фенолів, лікопіну та аскорбінової кислоти.

2. Коефіцієнт регідrataції. Більш високий коефіцієнт регідrataції є одним з найбільш бажаних властивостей висушених продуктів. Коефіцієнт регідrataції має тенденцію зменшуватися при сушінні. Однак він збільшується зі збільшенням температури сушіння. Спостерігається збільшення коефіцієнта регідrataції до певної температури, а потім зниження. Це пов'язано з тим, що більш висока температура викликає пошкодження внутрішньої клітинної структури, викликаючи менше поглинання води при регідrataції.

Сушіння в мікрохвильовій печі збільшує коефіцієнт регідrataції, ніж сушіння гарячим повітрям, оскільки воно викликає менше пошкодження структури тканини. Однак, зі збільшенням потужності мікрохвиль коефіцієнт регідrataції зменшується через пошкодження мембрани. Вакуумна та ультразвукова сушка має тенденцію до збільшення коефіцієнта регідrataції, оскільки ці процедури генерують висушені форми з меншим пошкодженням. Сублімаційне сушіння демонструє найвищий коефіцієнт регідrataції, ніж інші

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

методи, завдяки каналам, що утворюються при утворенні кристалів льоду, що призводить до більшого поглинання води.

3. Текстура. Текстура сушених помідорів значно відрізняється від свіжих. Відмінності в текстурі виникають через зміни мікроструктури при сушінні. До змін призводить затвердіння корпусу, розрив клітинної стінки, руйнування тканин. Осмотична попередня обробка підвищує м'якість тканин. Свіжі зразки мали найвищу твердість, за ними йшли оброблені у вакуумі, висушені гарячим повітрям і висушені на повітрі за допомогою мікрохвильової печі. Аналіз профілю текстури скибочок помідорів, висушених при різних температурах, показав, що скибочки, які висушені при температурі 60⁰С дають збалансовану твердість та хрусткість.

4. Смак і аромат. Існує більше 400 сполук, які разом сприяють свіжому смаку помідорів. Основними сполуками, що вносять смакові якості є цукри, амінокислоти, мінеральні речовини, жирні кислоти. На втрату характеристик сполуки впливають умови обробки. Також втрати при обробці томатної пасти були менші при обробці свіжих зразків при більш низькій температурі (60-75⁰С) в порівнянні з обробкою при більш високій температурі (85-95⁰С). Різні способи сушіння можуть виявляти відмінності в смаку і ароматі сушених форм. Різні методи сушіння можуть легко диференціювати за смаком і ароматом на основі аналізу [10-16]. Попередня обробка і обробка при низьких температурах дозволяє знизити втрати цих сполук. При сушінні томатів при нижчій температурі (45⁰С) в сушарці з гарячим повітрям і при розпилювальному сушінні м'якоти при 60⁰С зберігалася фруктові нота навіть при зневодненні. Так, сублімаційне сушіння зберегло більшу частину летких речовин, після чого слідувало сушіння розпиленням і сушіння гарячим повітрям.

3.2 Модель процесу сушіння томатів комбінованим інфрачервоним та конвективним нагрівом

Як відомо, томати мають високий вмістом вологи та є швидкопсувною сировиною. Тому процес сушіння пропонує досить тривалий термін зберігання. Для підвищення ефективності дифузії вологи необхідно поєднувати технології сушіння. Так, наприклад, у процесі сушіння використовується гаряче повітря, причому, при заданій температурі ентальпія сушильного середовища підвищується з підвищенням вологості. Однак, при низькій відносній вологості повітря матеріал прогрівається повільніше і навпаки, при високій ентальпії вологого повітря сировина швидко прогрівається протягом більш короткого періоду [11, 12]. У порівнянні зі звичайною технологією сушіння гарячим повітрям з низькою вологістю, зниження температури сушіння та підтримання високої відносної вологості може скоротити час нагрівання, оскільки вища відносна вологість на початку сушіння може призвести до швидкого підвищення внутрішньої температури матеріалу. Це покращує швидкість висихання і запобігає утворенню скоринки на поверхні матеріалу за рахунок швидкого висихання.

Сушарка з гарячим повітрям є найбільш часто використовуваним методом сушіння фруктів і овочів на комерційному рівні. Сушіння томатів за

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

допомогою цих методів широко використовується для впливу температури і швидкості на кінетику сушіння і якість одержуваного висушеного продукту. Крива сушіння для томатів показує, що процес сушіння в основному відбувається в області спадаючого періоду з відсутністю постійного періоду швидкості. У всіх випадках сушіння швидкість сушіння зростає зі збільшенням температури. Швидкість, як фактор, має більший вплив на час висихання та усадку, ніж температура. Товщина і форма сушильного матеріалу також відіграють важливу роль. При меншому розмірі (більша площа поверхні зрізу) швидше відбувається процес сушіння. Збільшення температури і швидкості та зменшення розміру скорочує загальний час процесу, однак це згубно впливає на якість сушених помідорів. Аскорбінова кислота найбільш сприйнятлива до термічної обробки, сушка гарячим повітрям викликає різку втрату аскорбінової кислоти.

Кінетика процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному і конвективному нагріванні полягає у впливі теплових потоків ПЧ-генератора і потоку гарячого повітря на сушильний об'єкт (томат). Інтенсивність зміни процесів тепломасообміну і їх коефіцієнти залежать від наступних параметрів режиму сушіння: потужності інфрачервоного джерела, довжини ПЧ-хвилі, щільності потоку випромінювання, температури гарячого повітря, вологості повітря, швидкості руху повітря, вологості і температури сировини. Фізична сутність процесу сушіння томатів залежить від процесів тепло- і масообміну, для яких характерні основні параметри передачі: коефіцієнти термодифузії, коефіцієнти вологопровідності, коефіцієнти теплопровідності, коефіцієнти фазового перетворення [10-15]. На рисунку 3.2 показано модель процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному і конвективному нагріві.

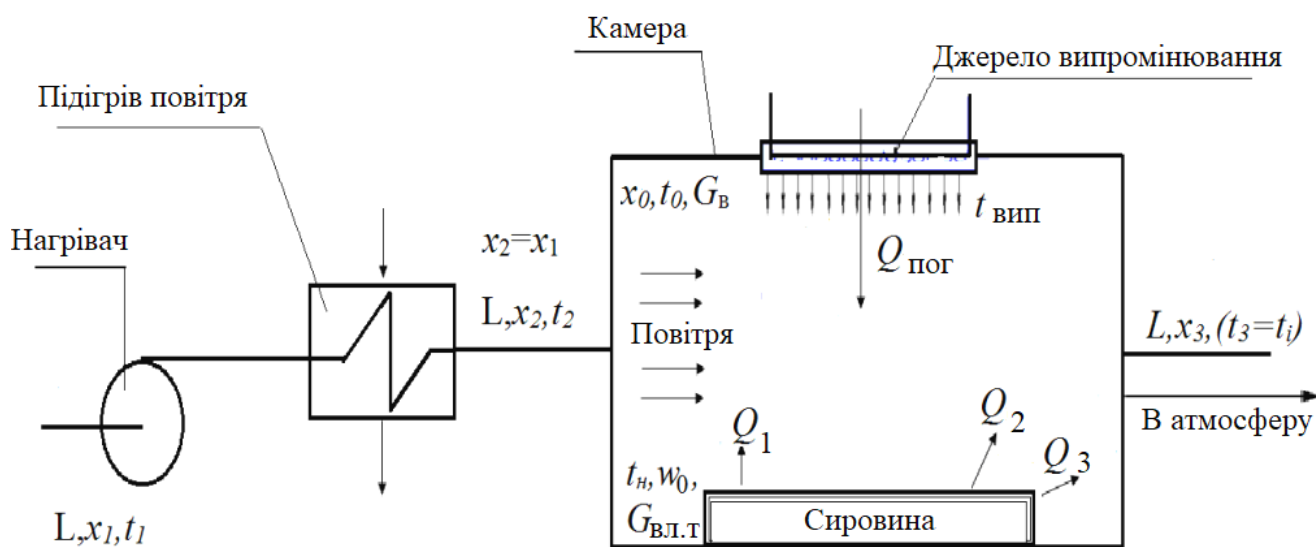


Рисунок 3.2 – Модель процесу сушіння томатів комбінованим інфрачервоним та конвективним нагрівом

де Q_1 – втрати тепла томатами, що нагріваються, в навколишнє середовище, Дж;

Q_2 – витрати теплового потоку при нагріванні сировини, Дж;

Q_3 – витрати теплового потоку у процесі випаровування вологи, Дж;

$Q_{\text{пог}}$ – тепловий потік, що поглинається сировиною при опроміненні, Дж.

Під час роботи сушарки інтерактивний інтерфейс «людина-машина» контролює температуру та вологість сушильної камери. Він також активує електричну нагрівальну пластину з інфрачервоним випромінюванням вуглецевого волокна. Повітря надходить у повітропровід з правого заднього повітрозабірника, нагрівається електричною нагрівальною трубкою та виходить з повітропроводу через повітрозабірник з лівого боку лотка для матеріалу, що надходить у сушильну камеру. Пластина інфрачервоного випромінювання з вуглецевого волокна нагріває сировину випускаючи інфрачервоне випромінювання. Повітряний потік повертається в повітророзподільну камеру через вихід повітря з правого боку після того, як томати і повітряний потік успішно обмінялися теплом. Вентилятор забезпечує рекуперацію відпрацьованого тепла та знижує споживання енергії сушильним пристроєм за рахунок обертання гарячого повітря в повітропроводі у вентилятор для вторинного обігріву.

Для розробки моделі сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному та конвективному нагріванні були прийнято:

– внутрішня площа поверхні корпусу сушильної камери S , м²;

– в камері знаходиться n вологої сировини у вигляді пластин товщиною R з початковою вологістю w_0 і початковою температурою t_n , градус;

– вага вологої сировини в камері $G_{\text{вл.т}}$, кг:

$$G_{\text{вл.т}} = V_{\text{вл.т}} \cdot \rho_{\text{вл.т}}$$

де $\rho_{\text{вл.т}}$ – щільність вологої сировини, кг/м³;

$V_{\text{вл.т}}$ – об'єм сировини.

– маса вологого повітря в камері $G_{\text{в}}$, кг:

$$G_{\text{в}} = V_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}}$$

де $\rho_{\text{в}}$ – щільність вологого повітря, кг/м³;

$V_{\text{в}}$ – об'єм вологого повітря.

– вологовмість вологого повітря в камері x_0 , кг/кг з початковою температурою t_0 т, градус;

– вологе повітря, що надходить в камеру $L_{\text{в}}$, кг/с, абсолютно сухе повітря $L_{\text{в}}$ кг/с;

– вологість повітря перед основним нагрівачем x_1 з температурою t_0 , вологе повітря нагрівається в зовнішньому нагрівачі до температури t_2 і подається в камеру;

– в камері встановлені нагрівальні панелі інфрачервоного випромінювання із вуглецевого волокна.

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

Інфрачервоне випромінювання передається від нагрівальних елементів до поверхні томатів, в той час як промениста енергія проникає в сировину і перетворюється в тепло, тобто тепло- і вологообмін відбувається в камері на поверхні і всередині сировини.

Теплота, що поглинається виробом від випромінювача і теплота, що подається з нагрітим повітрям, споживаються і нагріваються вологими продуктами і повертаються в навколишнє середовище разом з відпрацьованим повітрям. Температура t_i повітря в будь-якій точці сушильної камери дорівнює температурі вологого повітря на виході з установки. Вологість повітря x_2 в кінці сушіння дорівнює вологості x_3 повітря на виході з установки.

На основі вище зазначеного можна вважати, що томати мають високий вміст вологи із середнім початковим вмістом вологи близько 90% або більше. Такий високий вміст вологи робить його сприйнятливим до псування після збору врожаю, проте сушіння томатів є корисним для збільшення терміну зберігання цього швидкопсувного продукту. Мета сушіння не обмежується запобіганням псуванню та збільшенню терміну зберігання. Сушіння зменшує вагу та об'єм вантажу, що покращує обробку та зменшує економічні витрати, які пов'язані з транспортуванням.

Зазначено, що кінетика процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному і конвективному нагріванні полягає у впливі теплових потоків ПЧ-генератора і потоку гарячого повітря на сушильний об'єкт (томат). Інтенсивність зміни процесів тепломасообміну і їх коефіцієнти залежать від наступних параметрів режиму сушіння: потужності інфрачервоного джерела, довжини ПЧ-хвилі, щільності потоку випромінювання, температури гарячого повітря, вологості повітря, швидкості руху повітря, вологості і температури сировини. Фізична сутність процесу сушіння томатів залежить від процесів тепло- і масообміну, для яких характерні основні параметри передачі.

Під час роботи сушарки інтерактивний інтерфейс «людина-машина» контролює температуру та вологість сушильної камери. Він також активує електричну нагрівальну пластину з інфрачервоним випромінюванням вуглецевого волокна. Повітря надходить у повітропровід з правого заднього повітрозабірника, нагрівається електричною нагрівальною трубкою та виходить з повітропроводу через повітрозабірник з лівого боку лотка для матеріалу, що надходить у сушильну камеру. Пластина інфрачервоного випромінювання з вуглецевого волокна нагріває сировину випускаючи інфрачервоне випромінювання. Повітряний потік повертається в повітророзподільну камеру через вихід повітря з правого боку після того, як томати і повітряний потік успішно обмінялися теплом. Вентилятор забезпечує рекуперацію відпрацьованого тепла та знижує споживання енергії сушильним пристроєм за рахунок обертання гарячого повітря в повітропроводі у вентилятор для вторинного обігріву.

Розроблено модель процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному та конвективному нагріванні.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена удосконаленню конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості. У роботі зазначено, що сушіння є одним з найдавніших методів збереження продуктів. Застосовується для збереження сировини, що швидко псується шляхом зменшення вмісту вологи. Процес сушіння дозволяє знизити вартість і складність упаковки, обробки, транспортування і зберігання за рахунок перетворення матеріалу в суху тверду речовину, тим самим зменшуючи його вагу і в більшості випадків обсяг.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для сушіння сировини та приділено увагу кінетиці сушіння. Зазначено, що сушіння відбувається при випаровуванні рідини шляхом подачі тепла на вологу сировину. Рідина, що видаляється у процесі сушіння, може бути або вільною вологою (незв'язаною), або зв'язаною в структурі твердого тіла. Незв'язана волога, як правило, присутня у вигляді рідкої плівки на поверхні твердої частинки, легко випаровується, в той час як зв'язана волога може знаходитися всередині твердого матеріалу, утримуючись в мікроструктурі твердого тіла.

Аналіз наукових джерел дав змогу виявити, що крива сушіння зазвичай відображає співвідношення швидкості сушіння в залежності від часу сушіння або вмісту вологи. На кривій сушіння можна спостерігати три основні етапи сушіння: перехідна рання стадія під час якої продукт нагрівається (перехідний період); період постійної швидкості при якому вологу порівняно легко видалити; період спадаючої швидкості під час якого волога зв'язується або утримується в твердій матриці. Розглянуто типові криві швидкості сушіння та температурні криві сушіння

Вважається, що процес сушіння пов'язаний з високою потребою в тепловій енергії. Скорочення енерговитрат є пріоритетом з огляду на виснаження запасів викопного палива, забруднення навколишнього середовища, а також через фінансові міркування. Результатів можна досягти за рахунок підвищення ефективності систем і самого процесу сушіння, а також за рахунок використання технологічних рішень і обладнання, які гарантують зниження потреби в енергії. Тому існує потреба в системі сушіння, яка забезпечує як високу енергоефективність, так і відмінну якість продукції. Інноваційним рішенням може бути використання теплового насоса або комбінованих методів сушіння.

Другий розділ присвячено удосконаленню обладнання для інфрачервоного сушіння томатів. Зазначено, що на якість сушених помідорів впливає низка факторів, таких як зовнішні умови навколишнього середовища, тип сушарки, попередня обробка та властивості зразків, такі як сорт, зрілість та форма. Форма зразків, що підлягє сушінню, також впливає на час, який необхідний для

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Чижик				Удосконалення конструкційно-технологічних параметрів обладнання для інфрачервоної сушки томатів на основі контролю температури та вологості	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Цвіркун						41	2
Н. Контр.	Омельченко					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
Затверд.	Хорольський							

сушіння і на якість сушених томатів, четвертинки сушилися на 8,3% швидше, ніж половинки.

Запропоновано засоби оптимізації параметрів сушіння томатів. Вважається, за доцільне комплексне поєднання двох технологій сушіння, що сприятиме досягненню ефективного зневоднення томатів, а саме поєднання інфрачервоної сушки із конвективним сушінням.

Запропоновано комбіноване інфрачервоне та гаряче повітряне сушильне обладнання на основі контролю температури та вологості для сушіння томатів з метою підвищення ефективності та результативності сушіння. Датчик температури PT100 використовувався для вимірювання температури в сушильній камері під час процесу сушіння. Температура сушіння має бути регульованою, що запобігає погіршенню якості, яке виникає в результаті сушіння при високих температурах. Датчиком вологості обрано OMEGA HX71 для вимірювання відносної вологості повітря в сушильній камері під час сушіння томатів. Висока вологість призводить до того, що поверхнева волога випаровувалася в сушильну камеру під час ранньої фази сушіння. Коли відносна вологість повітря перевищуватиме заданий рівень спрацьовуватиме витяжний вентилятор, який виштовхуватиме вологість назовні. Витяжний вентилятор можна відключати, а зволожувач включити, коли показання датчика вологості будуть знижуватися нижче заданого рівня.

Блок моніторингу даних виконує аналіз температури та вологості в камері у режимі реального часу. Дані моніторингу в сушильній камері відображаються у режимі реального часу на сенсорному екрані взаємодії людини з комп'ютером, що дозволяє оператору приймати обґрунтовані рішення та за необхідності регулювати режими.

У третьому розділі розроблено модель процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному та конвективному нагріванні. Кінетика процесу сушіння томатів при комбінованому інфрачервоному і конвективному нагріванні полягає у впливі теплових потоків ПЧ-генератора і потоку гарячого повітря на сушильний об'єкт (томат). Інтенсивність зміни процесів тепломасообміну і їх коефіцієнти залежать від наступних параметрів режиму сушіння: потужності інфрачервоного джерела, довжини ПЧ-хвилі, щільності потоку випромінювання, температури гарячого повітря, вологості повітря, швидкості руху повітря, вологості і температури сировини.

Під час роботи сушарки інтерактивний інтерфейс «людина-машина» контролює температуру та вологість сушильної камери. Він також активує електричну нагрівальну пластину з інфрачервоним випромінюванням. Повітря надходить у повітропровід, нагрівається електричною нагрівальною трубкою та виходить з повітропроводу через повітрозабірник з лівого боку лотка для матеріалу, що надходить у сушильну камеру. Пластина інфрачервоного випромінювання нагріває сировину випускаючи інфрачервоне випромінювання. Повітряний потік повертається в повітророзподільну камеру через вихід повітря з правого боку після того, як томати і повітряний потік успішно обмінялися теплом. Вентилятор забезпечує рекуперацію відпрацьованого тепла та знижує споживання енергії сушильним пристроєм за рахунок обертання гарячого повітря в повітропроводі у вентилятор для вторинного обігріву.

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

