

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.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 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 АПАРАТУ ДЛЯ СУШІННЯ ЕКСТРАКТУ  
КОРЕНЯ ІМБИРУ»**

Виконав:  
здобувач вищої освіти Калмиков Дмитро Сергійович  
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

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

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

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Кривий Ріг  
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО

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

Форма здобуття вищої освіти денна

Ступінь магістр

Галузь знань Механічна інженерія

Освітня програма Обладнання переробної і харчової промисловості

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання  
переробної і харчової промисловості»  
Хорольський В.П.

«    »                                  2023 року

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

Калмиков Дмитро Сергійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення апарату для сушіння екстракту кореня імбиру»

Керівник роботи к.п.н., Цвіркун Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом першого проректора ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського від « 02 » травня 2023 р. № 69-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 22 » листопада 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічна документація до устаткування.

2. Монографії, наукові статті, автореферати дисертацій, тези доповідей на наукові конференції.

3. Навчальна і методична література, інформація мережі Інтернет.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.

2. Аналітичний огляд обладнання для сушіння рослинної сировини.

3. Удосконалення апарату для сушіння імбиру.

4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Схеми обладнання для сушіння рослинної сировини.

Технічні характеристики апарату для сушіння рослинної сировини.

Технічні характеристики сушильної шафи СП-300 з примусовою конвенцією.

Технічні характеристики приладу для вимірювання теплопровідності МІТ-1.

Графіки залежності зміни вологості від часу висихання при різних температурах сушіння.

6. Дата видачі завдання «1» вересня 2023 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	4.09-20.09.2023 р.
2	Аналітичний огляд обладнання для сушіння рослинної сировини	21.09-18.10.2023 р.
3	Удосконалення апарату для сушіння імбиру	19.10-08.11.2023 р.
4	Аналіз результатів досліджень	09.11-15.11.2023 р.
5	Висновки по роботі	16.11-22.11.2023 р.
6	Оформлення роботи і подання до захисту	23.11-26.11.2023 р.

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_

(підпис)

Калмиков Д.С.

(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 – 42 сторінки. Робота містить: 2 таблиці, 20 рисунків. Список використаних джерел складається з 12 найменувань.

Об'єкт роботи – апарат для сушіння рослинної сировини.

Предмет роботи – процес сушіння небланшованого, бланшованого, очищеного, неочищеного імбиру.

Мета роботи – удосконалення процесу та апарату для сушіння кореня імбиру.

У роботі зазначено, що імбир є не лише лікарським засобом, а й однією з найпоширеніших спецій, яка широко реалізується на світових ринках. Завдяки високому вмісту вологи свіжий імбир швидко псується, що зумовлює необхідність удосконалення методів сушіння, які сприятимуть збільшенню термінів його зберігання.

На основі аналізу, було визначено, що перспективним є комбіноване мікрохвильове конвективне сушіння, яке сприяє збереженню кольору та вмісту поживних речовин, ніж звичайне конвективне сушіння. Поєднання інфрачервоного та конвективного сушіння значно скорочує час сушіння без шкоди для якості продукції. Вакуумне конвективне сушіння призводить до більшого збереження вмісту олії та кращого збереження кольору порівняно з традиційним конвективним сушінням.

Запропоновано, для «пом'якшення» здійснення видалення вологи, і, як наслідок, збереження якісних параметрів імбиру застосовувати поєднання конвективного з інфрачервоним підведенням теплової енергії. Інфрачервоне випромінювання буде передаватися від нагрівальних елементів до поверхні імбиру, при цьому промениста енергія проникатиме в сировину і буде перетворюватися в теплову, тобто відбуватиметься тепло і вологоперенесення: в камері, на поверхні, всередині імбиру.

Акцентовано увагу на тому, що баланс між швидкістю сушіння і підтриманням якості продукції є важливим при визначенні оптимальної температури сушильного повітря. Було розглянуто залежність зміни вологості від часу висихання для зразків імбиру при різних температурах сушіння. Дослідження проводилося для небланшованого, бланшованого, очищеного, неочищеного імбиру.

Визначено, що оптимальною температурою повітря для сушіння імбиру є 60°C. При такій температурі процес конвективного сушіння ефективно знижував вологість сировини при збереженні її якості. Надмірно висока температура повітря може погіршити якість продукту, спричиняючи зміни кольору, текстури та поживної цінності. Зі збільшенням температури процесу сушіння від 20°C до 60°C вміст вологи в кожному зразку імбиру зменшується, отже, із підвищенням температури вміст вологи зменшується, що забезпечить подальше отримання якісного сухого екстракту імбиру.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** сушка, конвективне сушіння, імбир, сухий екстракт, сушильної шафа, температура, вологість, теплопровідність, колір, текстура.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ	7
1.1 Методи сушіння продуктів харчування	7
1.2 Аналіз обладнання для сушіння рослинної сировини	9
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АПАРАТУ ДЛЯ СУШІННЯ ІМБИРУ	19
2.1 Конвективне сушіння імбиру із додатковим підведенням ГЧ-енергії	19
2.2 Оптимізація процесу конвективного сушіння імбиру	22
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	30
3.1 Удосконалення методів сушіння імбиру для отримання сухого екстракту	30
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	41

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Калмиков</i>			<b>Удосконалення апарату для сушіння екстракту кореня імбиру</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					5	1
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>				<b>ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО</b>		
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** У роботі зазначено, що імбир є не лише лікарським засобом, а й однією з найпоширеніших спецій, яка широко реалізується на світових ринках. Він має зігріваючий ефект, смак як із пряними, так і з солодкими нотками. Імбир не тільки додає смаку страві, але й має потужні антиоксидантні оздоровчі властивості. Він має унікальну композицію смакових та лікувально-профілактичних властивостей. Завдяки високому вмісту вологи свіжий імбир швидко псується, що зумовлює необхідність удосконалення методів сушіння, які сприятимуть збільшенню термінів його зберігання.

**Мета та задачі дослідження.** Метою магістерської роботи є удосконалення процесу та апарату для сушіння кореня імбиру.

**Практична та наукова новизна.** На основі аналізу, було визначено, що перспективним є комбіноване мікрохвильове конвективне сушіння, яке сприяє збереженню кольору та вмісту поживних речовин, ніж звичайне конвективне сушіння. Поєднання інфрачервоного та конвективного сушіння значно скорочує час сушіння без шкоди для якості продукції. Вакуумне конвективне сушіння призводить до більшого збереження вмісту олії та кращого збереження кольору порівняно з традиційним конвективним сушінням.

Запропоновано, для «пом'якшення» здійснення видалення вологи, і, як наслідок, збереження якісних параметрів імбиру застосовувати поєднання конвективного з інфрачервоним підведенням теплової енергії. Інфрачервоне випромінювання буде передаватися від нагрівальних елементів до поверхні імбиру, при цьому промениста енергія проникатиме в сировину і буде перетворюватися в теплову, тобто відбуватиметься тепло і вологоперенесення: в камері, на поверхні, всередині імбиру.

Акцентовано увагу на тому, що баланс між швидкістю сушіння і підтриманням якості продукції є важливим при визначенні оптимальної температури сушильного повітря. Було розглянуто залежність зміни вологості від часу висихання для зразків імбиру при різних температурах сушіння. Дослідження проводилося для небланшованого, бланшованого, очищеного, неочищеного імбиру.

Визначено, що оптимальною температурою повітря для сушіння імбиру є 60°C. При такій температурі процес конвективного сушіння ефективно знижував вологість сировини при збереженні її якості. Надмірно висока температура повітря може погіршити якість продукту, спричиняючи зміни кольору, текстури та поживної цінності. Зі збільшенням температури процесу сушіння від 20°C до 60°C вміст вологи в кожному зразку імбиру зменшується, отже, із підвищенням температури вміст вологи зменшується, що забезпечить подальше отримання якісного сухого екстракту імбиру.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Калмиков</i>			<b>Удосконалення апарату для сушіння екстракту кореня імбиру</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					6	1
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>				<b>ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО</b>		
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

### 1.1 Методи сушіння продуктів харчування

Псування харчових продуктів відноситься до незворотних змін у харчових продуктах, які стають неїстівними. Псування їжі можна запобігти або шляхом упровадження способів консервування, одним з яких є сушіння. Сушіння – це процес видалення води для запобігання росту мікроорганізмів, які можуть викликати процес гниття; також мінімізує побічні реакції, опосередковані при наявності води.

Принцип сушіння полягає у видаленні вмісту води шляхом зневоднення. Зневоднення їжі – видалення воду з їжі шляхом циркуляції гарячого повітря, зупинки ферментів і діяльності мікроорганізмів. Технології сушіння харчових продуктів давно застосовуються, а саме: сушка на сонці або через вітер. Ці методи використовуються і сьогодні, оскільки вони вважаються більш економічними та ефективними за рахунок використання природної енергії. Проте таке сушіння зазвичай займає багато часу, що призводить до значної деградації поживних і біоактивних речовинних сполук. Останнім часом зроблені різні спроби розвитку техніки сушіння для зменшення та мінімізації вмісту вологи, розкладання біоактивних компонентів, яке спричинене біохімічними змінами та зниженням харчової цінності під час процесу сушіння. Всі ці способи відрізняються принципами і механізмами, які мають певні переваги та недоліки.

Сушіння – це процес зневоднення, тобто видалення води із харчових продуктів за допомогою тепла отриманого від гарячого повітря або сонячної енергії. Видалення води має бути досягнуте в мінімальних умовах для покращення якості продукції. При сублімаційному сушінні передача, під час сушіння, здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання, що сприяє випаровуванню води. Розглянемо деякі способи сушіння [2, 4, 6, 8].

*Спосіб сушіння на сонці.* Сушіння на сонці – спосіб сушіння продукції за допомогою прямого висушування під час перебування на сонці. Цей спосіб має перевагу в економії витрат та енергії. Однак, оскільки він використовує природну енергію, метод сильно залежить від змін погоди, які мають тенденцію до нестабільності. Наприклад, сушіння перцю на сонці здійснюється за допомогою вирівнювача експозиції поверхні, яке може тривати протягом тижня, середня температура 20-37°C.

*Метод сушіння розпиленням.* Сушіння розпиленням часто використовується для чутливих до тепла продуктів харчування. Метод має меншу питому енергію споживання, ніж спосіб сублімаційної сушки. Під час

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Калмиков</i>				<b>Удосконалення апарату для сушіння екстракту кореня імбиру</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						7	12
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				<b>ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО</b>			
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

такого сушіння емульсії або суспензії перетворюються в твердий продукт, за рахунок постійного закачування в розпилювач розчину рідини, що розділяється на дрібні краплі в камері. Ці крапельки, що утворилися, потрапляють і контактують з гарячим повітрям шляхом конвекції, забезпечуючи теплову енергію, яка випаровує більшу частину розчинника краплями з утворенням порошкових частинок. Сушіння розпиленням має перевагу тому, що відносно низькі експлуатаційні витрати і короткий процес сушіння. Однак, у цьому способі сушіння використовуються високі температури..

*Барабанний спосіб сушіння.* Барабанне сушіння містить барабан, який безперервно обертається і нагрівається. Барабанні сушарки мають високу ефективність сушіння, з теплоенергією ККД 60-90%, низькі експлуатаційні витрати. Під час сушіння матеріал у вигляді рідини, суспензії подається на зовнішню поверхню барабана, що обертається, щоб сформувати тонкий шар приблизно 0,5-2,0 мм, що покриває поверхню барабана. Температура поверхні барабана дуже висока через нагрівання парів у всередині барабана. Конденсат пари підвищує температуру і нагрівання суспензії через стінку барабана. Час сушіння залежить від швидкості обертання барабана.

*Метод сублімаційного сушіння.* Сублімаційне сушіння – це процес сублімації води після заморожування. Харчова та фармацевтична промисловість зазвичай використовують сухі продукти, зберігаючи їх біоактивні властивості і компоненти. Процес включає три стадії: заморожування, первинне сушіння і вторинне сушіння. Інгредієнти обробляються на низьких температурах до замерзання. Основним принципом сушіння є сублімація. Сублімація – це прямий перехід від твердого стану до газоподібного без ініціювання рідкої фази, де лід безпосередньо переходить в пар. Відповідно, висушеного продукту має бути менше. Первинний етап сушіння становить  $-10^{\circ}\text{C}$  або менше при абсолютному тиску 2 мм рт.ст. Приховане тепло від сублімації проводиться через сухий і заморожений шари, в той час як пара транспортується через пористі сухі речовини шари.

*Метод сушіння в мікрохвильовій печі.* Мікрохвилі – це електромагнітні хвилі з діапазоном від 1 мм до 1 м із діапазоном частот від 0,3 ГГц до 3,0 ГГц. Ці частоти більші, ніж радіохвилі. Температура проникає всередину їжі, спричиняючи нагрівання води всередині інгредієнтів. Це підвищує тиск пари, відмінність між центром і поверхнею продукту, забезпечуючи швидкий перехід вологи з матеріалу. Взаємодія мікрохвиль із середовищем викликає нагрівання.

Електромагнітна енергія розсіюється і перетворюється в об'ємне тепло. Механізм зміни цієї енергії залежить від характеристик середовища та частоти хвиль. Для овочів часто використовують цей метод сушіння. Мікрохвильове сушіння ефективніше для захисту продукції від зміни кольору. Але цей спосіб не підходить для м'яти і коріандру. Під час сушіння імбиру відбувається висихання, яке спричинило побуріння та пошкодження тканини, яке посилювалося з температурою та потужністю мікрохвиль. Регідратаційна здатність зменшується зі збільшенням температури висихання. Мікрохвильова піч може скоротити час висихання на 25-90% і збільшити швидкість сушіння в 4-8 разів порівняно зі звичайним сушінням. Також сушіння в мікрохвильовій

									ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ	Арк.
										8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



печі призводить до кращої однорідності та більш ефективного використання енергії.

## 1.2 Аналіз обладнання для сушіння рослинної сировини

При розпиленні сировини значно зростає та оновлюється поверхня міжфазного контакту, що при збільшенні коефіцієнтів масо- та теплопередачі веде до підвищення швидкості процесів переносу теплової енергії до речовини. Специфічними перевагами розпилювального вологовидалення є тонкодисперсність і висока розчинність порошкового матеріалу.

Широко застосовуються способи конвективного сушіння при протитечії фазових потоків; центральному закрученому та тангенціальному підводі теплоносія та зустрічних потоків продукту в залежності від вибору способу диспергування. Застосовуються різні методи підведення, які поділяють на гідравлічні, механічні; пневматичні; ультразвукові, електрогідравлічні та ін.

Проблемними питаннями при організації процесу розпилювального зневоднення є [5, 7, 9]:

- великі питомі габаритні розміри (діаметр та висота), які обумовлені витратними величинами потоків та параметрами факела розпилення, а також аеродинамічними умовами фазового контакту та часом вологовидалення;

- порівняльне підвищення енерговитратності і, як наслідок, собівартості модернізації сушильних апаратів та вузлів розпилення та уловлювання продукту;

- обмеження за габаритами тривалістю фазового контакту фаз при витанні частинок матеріалу в сушарці продукту в робочій камері тощо.

Розглянемо обладнання для сушіння екстракту коріння імбиру [4, 5, 6, 8, 10, 12].

Установка для сушіння на інертних носіях із зустрічними закрученими потоками має порівняно високу питому продуктивність (рис. 1.1).

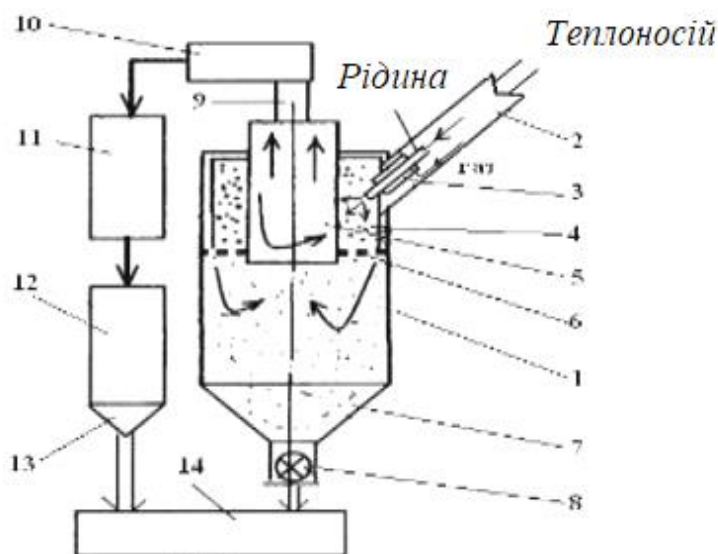


Рисунок 1.1 – Розпилювальна установка для сушіння на інертних носіях

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

На рис. 1.1. позначено: 1 – обічайка; 2 – сопла; 3 – розпилювачі; 4 – інертний носій; 5 – центральний повітропровід; 6 – газорозподільні ґрати; 7 – бункер; 8 – шлюзовий затвор; 9 – трубопровід; 10 – акустичний вузол; 11 – циклон; 12 – рукавний фільтр; 13 – бункер; 14 – конвеєр.

Зневоднений матеріал подається через форсунки на інертні носії, які відокремлюються від поверхні при висиханні та відводяться через шлюзовий затвор або з потоком теплоносія, що відпрацював. Частина матеріалу через акустичний вузол надходить у циклон, фільтр рукавний і на конвеєр.

Розглянемо сушарку з інертною насадкою (рис. 1.2). Вона містить корпус з перфорованими розподільними ґратами та шаром інертної насадки, багатоступінчастий відбійник для поділу її та сухого продукту. Відбійник складається з ряду струн, закріплених по перерізу корпусу та утворюють правильні геометричні фігури або промені рівномірного перфорування та лінійної зміни опору.

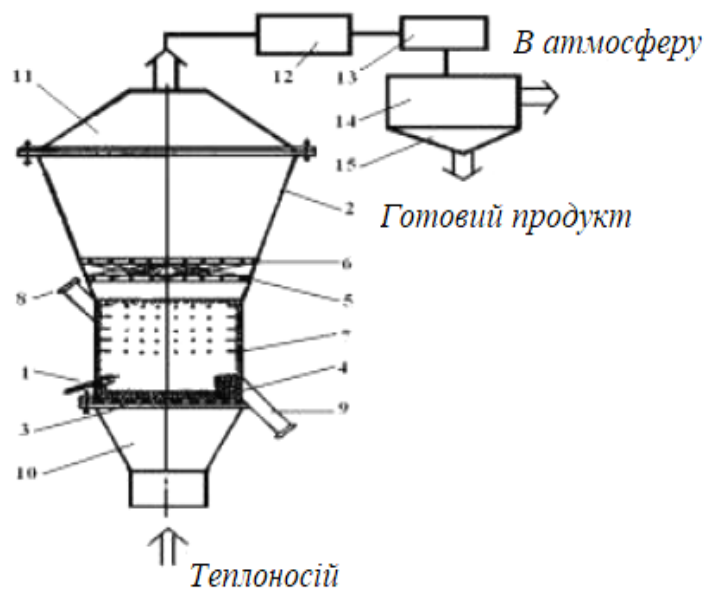


Рисунок 1.2 – Установка для сушіння на інертних носіях

На рис. 1.2 зображено: 1 – розпилювач; 2 – корпус; 3 – перфоровані розподільні ґрати; 4 – шар інертної насадки; 5, 6 – ободи; 7 – багатоступінчастий відбійник; 8, 9 – патрубки; 10 – короб; 11 – кришка; 12 – акустичний вузол; 13 – циклон; 14 – рукавний фільтр; 15 – бункер.

Сушіння – це процес видалення води задля запобігання росту мікроорганізмів, які можуть викликати процес гниття; також мінімізує побічні реакції, опосередковані при наявності вода. Принцип сушіння полягає у видаленні вмісту води шляхом зневоднення. Зневоднення їжі – видалення води з їжі шляхом циркуляції гарячого повітря, зупинки ферментів і діяльності мікроорганізмів.

Для інтенсифікації вологовидалення з рідких фаз установка з вихровими потоками, що включає в себе, як мінімум, дві, пов'язані між собою, вихрові камери з переточним віконцем (рис. 1.3).

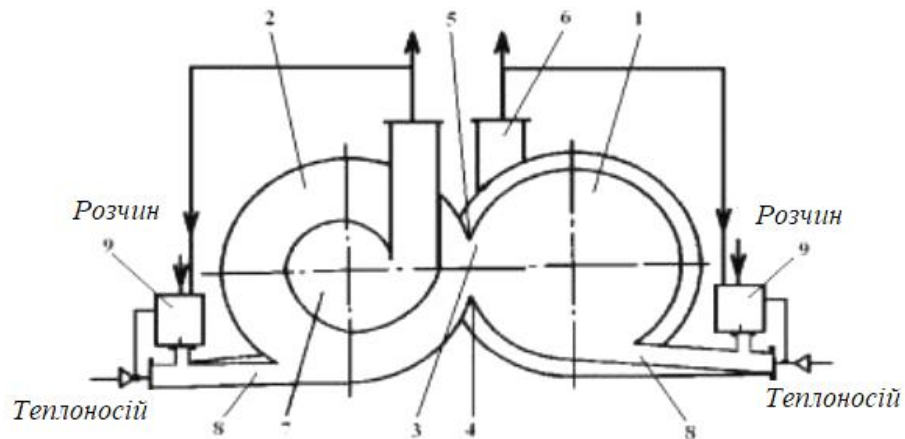


Рисунок 1.3 – Установка для сушіння розпиленням у вихрових потоках

На рис. 1.3 позначено: 1, 2 – вихрові камери; 3 – сполучення; 4,5 – гребені; 6, 7 – равлики; 8 – патрубок; 9 – вузол подачі матеріалу на сушіння.

Для зниження матеріальних втрат шляхом мінімізації налипання об'єкта сушіння пропонується вихровий апарат (рис. 1.4).

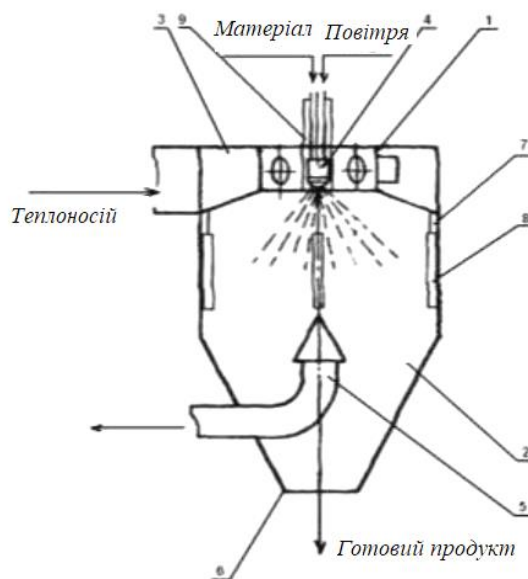


Рисунок 1.4 – Вихровий апарат для сушіння рослинної сировини

На рис. 1.4 зображено: 1 – циліндр; 2 – корпус; 3, 5, 6 – патрубки; 4 – форсунка; 7 – сопла щілинні; 8 – лопатки; 9 – корпус форсунки.

Установка для сушіння в псевдокиплячому шарі інертного матеріалу включає: корпус з перфорованими ґратами, розпилювач та пластини для вібрації, які розташовані в корпусі при можливому повороті щодо осей (рис. 1.5). На них у шаховому порядку, під кутом до них, встановлені додаткові

пластини різної довжини для підвищення ефективності поділу інертного та висушуваного матеріалів.

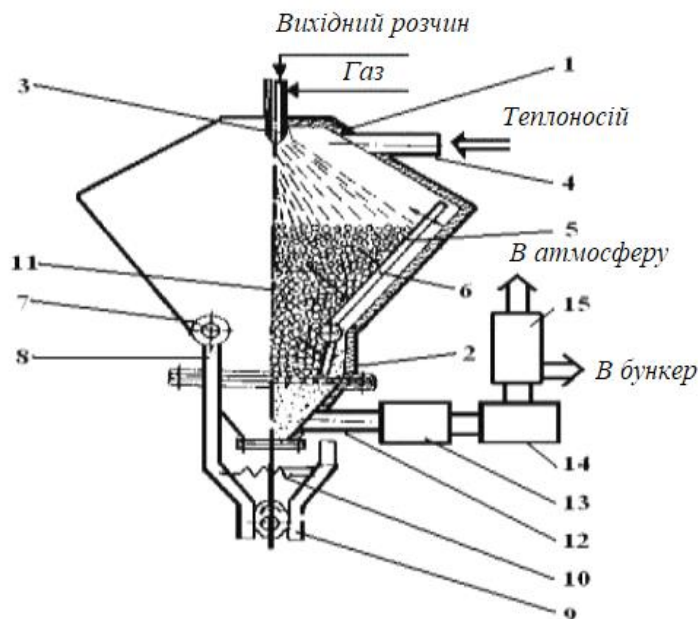


Рисунок 1.5 – Сушарка з псевдокиплячим шаром інертного матеріалу

На рис. 1.5 позначено: 1 – корпус; 2 – перфоровані розподільні ґрати; 3 – акустичний розпилювач; 4 – вхідний патрубок для сушильного агенту; 5 – інертний матеріал; 6 – вібропластини; 7 – вал; 8 – штанги; 9 – кулачок; 10 – пружина; 11 – додаткові пластини; 12-вихідний патрубок для сушильного агенту; 13 – акустичний вузол; 14 – циклон; 15 – рукавний фільтр.

Сушильна установка, що дає можливість зростання питомої продуктивності за рахунок зменшення матеріальних втрат, яка містить циліндр з вузлом, що розпилює (рис. 1.6). До торця вихідного патрубку кріпиться труба, а у вільний торцевий отвір монтується спіральна стрічка, що має можливість обертання. У конструкції установки передбачені прорізи, одна з кромки яких відігнута назовні, а інша – усередину труби.

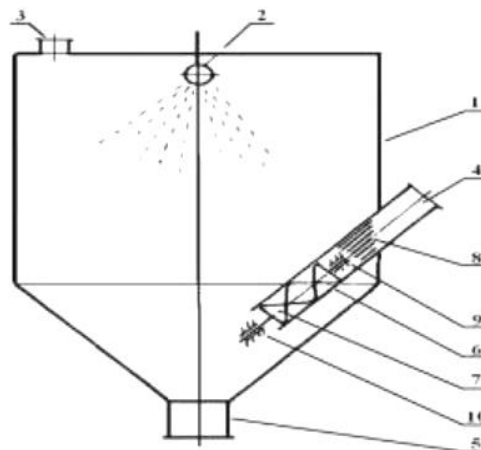


Рисунок 1.6 – Розпилювальний сушильний апарат.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

На рис. 1.6 позначено: 1 – циліндр; 2 – розпилювальний пристрій; 3 – вхідний патрубок; 4 – вихідний патрубок для теплоносія; 5 – патрубок виведення готового продукту; 6 – труба; 7 – стрічка спіральна; 8 – прорізи; 9 та 10 – підшипники.

Апарат для сушіння у розпорошеному стані рослинної сировини зображено на рисунку 1.7.

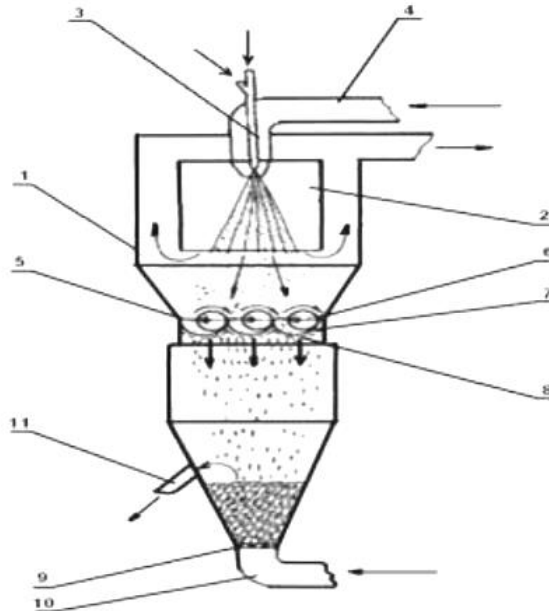


Рисунок 1.7 – Апарат для сушіння у розпорошеному стані рослинної сировини

На рис. 1.7 позначено: 1 – корпус; 2 – розпилювальний вузол; 3 – акустичний розпилювач; 4 – верхній повітряний розподільник; 5 – вузол гранулювання; 6 – ексцентрикові валки; 7 – профільні лотки; 8 – сітка; 9 – повітророзподільні ґрати; 10 – нижній повітряний розподільник; 11 – виведення гранульованого матеріалу.

Відомо безліч конструкторських розробок для здійснення сушіння сировини у розпорошеному вигляді. Стандартизують сухі витяжки на рослинній основі за вмістом вологи; концентрації активних речовин та важких металів. Сухі витяжки з необмеженим лімітом активних речовин отримують з сировини, у складі якої переважають малоактивні речовини, а екстракти з обмеженим лімітом активних речовин виробляють з лікарськими сировинними матеріалами [4, 5]. Апарат для сушіння дисперсних продуктів розглянуто на рисунку 1.8. Агрегат із соплами для підведення теплоносія, встановленими по хордах корпусу, осі яких розташовані тангенційно до уявного кола і центральною форсункою.

Апарат скомпонований з двох циліндрів різного діаметра, причому менший з них становить 1,0..1,5 від діаметра уявного кола, а у більшому встановлені дві ґрати, між якими знаходяться інертні носії, а самі вони розміщені зверху та знизу колекторів із соплами, причому, система відкачування забезпечена перфорованим козирком.

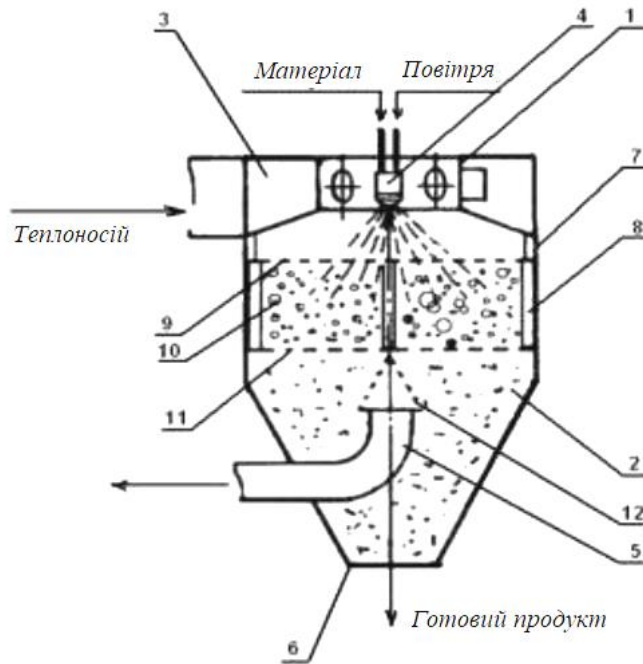


Рисунок 1.8 – Установа для сушіння у вихрових потоках на інертних носіях

На рис. 1.8 зображено: 1 – циліндрична ємність, 2 – корпус, 3, 5, 6 – патрубки, 4 – диспергатор, 7 – сопла щілинні, 8 – лопатки, 9, 11 – решітки газорозподільні, 10 – насадка інертна, 12 – козирок перфорований.

Установа для зневоднення розрідженого потоку тонкодисперсних частинок при їх рівномірній щільності за обсягом робочої камери, що призводить до рівномірного об'ємного видалення вологи з об'єкта сушіння, представлена на рисунку 1.9.

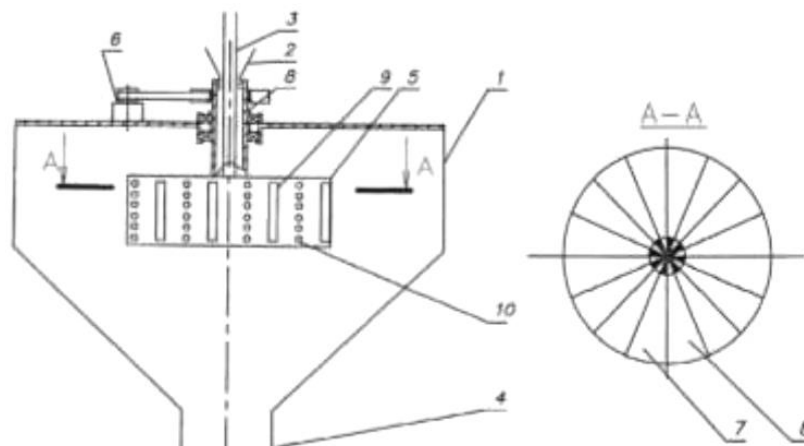


Рисунок 1.9 – Розпилювальна установа для сушіння

На рис. 1.9 позначено: 1 – робоча камера; 2-завантажувальний вузол для продукту; 3 – вузол подачі теплоносія; 4 – вивантажувальний вузол; 5 – циліндрична ємність; 6 – привідна станція; 7, 8 – сектори; 9, 10 – вікна.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Внутрішній об'єм циліндричної ємності 5 поділений на сектори 7 і 8, які розташовані по колу. Сектор 7 пов'язаний із системою підведення повітря, а 8 – з вузлом подачі матеріалу 2. У циліндричній ємності є прямокутні вікна секторів 9 та 10, пов'язані з системою повітряного розподілу та вузлом подачі матеріалу відповідно. Матеріалоповітряна суміш направляється в циліндр, що обертається 5. Теплоносій почергово продуктової розчин направляє в сектори 8 та 7 відповідно [4, 5, 10]. За рахунок відцентрової сили повітря розчин просувається до периферії секторів 8 і пройшовши крізь вікна 10, розчин піддається диспергуванню. Конструкторське виконання вікон 10 дає можливість організувати розріджений плаский потік дисперсних, з рівномірним розподілом їх густиною, по зоні сушіння. Через прямокутні вікна 9 теплоносій ефективно проникає в розріджений потік продукту, що висушується. Чергування секторів дає можливість зрівняти умови міжфазної взаємодії щодо обсягу зони сушіння, що веде до скорочення витрат теплової енергії та підвищення якості продукції.

Такі ж переваги має апарат для розпилювального сушіння (рис. 1.10). Тут площі поперечних отворів у секціях зростають по нормальному закону розподілу поверхнею диска 9 до верху і до низу.

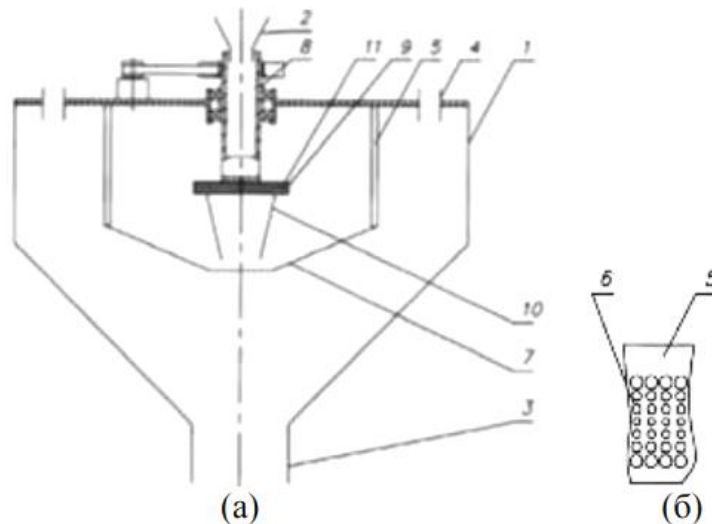


Рисунок 1.10 – Апарат для розпилювального сушіння (а), частина розгортки відбивача (б)

На рис. 1.10 зображено: 1 – корпус сушарки; 2 – завантажувальний пристрій для продукту; 3 – розвантажувальний пристрій; 4 – патрубок для підведення повітря; 5 – відбивач перфорований; 6 – отвори; 7 – приймач конічний; 8 – вал; 9 – диск; 10 – насадка; 11 – радіальні канали.

На сьогоднішній момент є безліч конструктивних особливостей апаратів для розпилювального зневоднення, реалізація яких дозволяє в тій чи іншій мірі усунути недоліки типових сушильних агрегатів. Концентрування здійснюють, як правило, у випарних агрегатах при розрідженні в них для зниження екстракту з метою збереження його якісних властивостей. Залежно від заданої продуктивності та якісних параметрів сухих витяжок видалення вологи з них проводять шляхом сушіння в розпорошеному стані або у вакуумних сушильних

апаратах. Тому, значна частка у витратах енергії на реалізацію технології висушених екстрактів посідає операція вологовидалення.

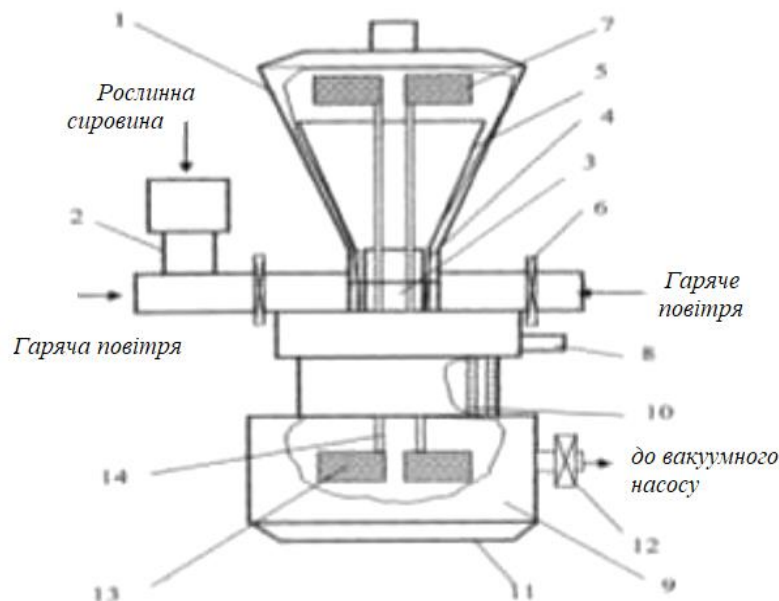


Рисунок 1.11 – Енергозберігаюча двостадійна сушарка для продуктів на рослинній основі

На рис. 1.11 позначено: 1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – барабан; 4 – циліндрична вставка; 5 – конічна вставка; 6 – затвори кульові; 7 – акумулятор тепла; 8 – перекриття; 9 – камера; 10 – обичайки; 11 – кришка; 12 – система вакуумного відкачування; 13 – акумулятор тепла; 14 – труби теплові.

Зменшити витрати тепла при втраті виходу сухого продукту можна за умови впровадження конструкції двостадійного сушильного агрегату для продуктів на рослинній основі, показаного рисунку 1.11. Режимні параметри на 1-й та 2-й стадії підбираються за умови рівнозначності часу знаходження матеріалу у них. Циклічність обдування та вакуумування обумовлені ступенем подрібнення та ізотропністю об'єкта зневоднення та залишковим вмістом води в продукті.

Розглянемо деякі ефективні способи сушарок шляхом організації підведення ІЧ енергії при видаленні води із продуктів на рослинній основі, а саме конструкції комплексного сушильного агрегату, а також ІЧ сушарки, яка дозволяє інтенсифікувати процес видалення вологості при стабілізації енергетичних параметрів ІЧ енергопідведення, мінімізації забруднення поверхонь ІЧ ламп, рівномірному розподілі, що падає на поверхню висушуваного продукту, променистого теплового потоку в комбінації з конвективним підведенням рівномірного тепла на всіх піддонах [7, 9, 11]. Реалізація конструкції апарату для інфрачервоної термічної обробки насіння баштанової сировини призведе до скорочення часу операції термообробки за рахунок опромінення, що чергується з обох сторін пласкої сім'янки при усуненні можливості її підгоряння та обвуглювання.



Апарат для видалення води із плодовоовочевої сировини (рис. 1.12, 1.13). Оскільки просування вологи відбувається по напрямку потоку тепла, мікрохвильова обробка продукту в полі НВЧ енергії прискорює пересування смакових, ароматичних та барвників від поверхні внутрішньо ягоди або плода, зберігаючи їх у сухих продуктах.

Мікрохвилі – це електромагнітні хвилі з діапазоном від 1 мм до 1 м із діапазоном частот від 0,3 ГГц до 3,0 ГГц. Ці частоти більші, ніж радіохвилі. Температура проникає всередину їжі, спричиняючи нагрівання води всередині інгредієнтів [8]. Це підвищує тиск пари, відмінність між центром і поверхнею продукту, забезпечуючи швидкий перехід вологи з матеріалу. Взаємодія мікрохвиль із середовищем викликає нагрівання. Електромагнітна енергія розсіюється і перетворюється в об’ємне тепло. Механізм зміни цієї енергії залежить від характеристик середовища та частоти хвиль. Для овочів часто використовують цей метод сушіння.

Періодична подача мікрохвильового випромінювання до об’єкта обробки є сприятливою для підвищення внутрішнього тиску пари при зниженні  $T$  поверхні матеріалу, і, як наслідок, інтенсифікацію сушіння та мінімізацію карамелізації плодово-ягідної продукції.

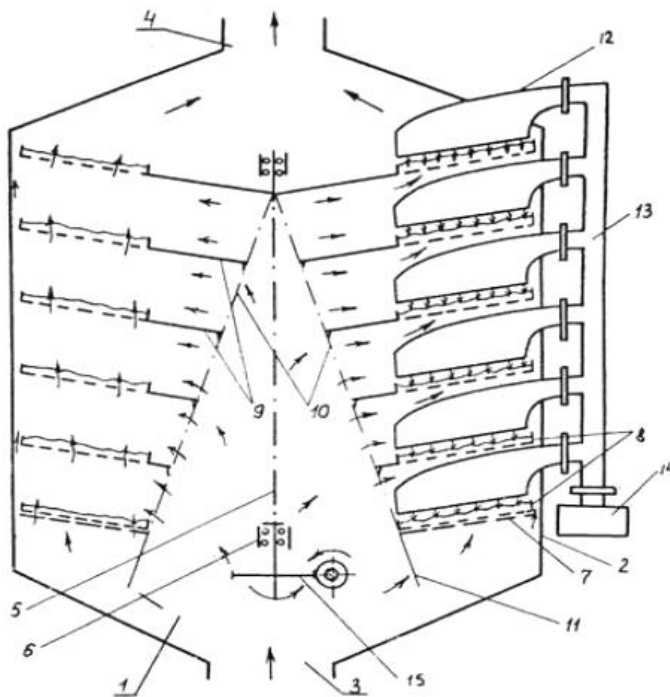


Рисунок 1.12 – Пристрій для зневоднення плодово-ягідної сировини

На рис. 1.12 зображено: 1 – робоча камера; 2 – корпус; 3 – вхідне сопло; 4 – вихідне сопло; 5 – вал; 6 – підшипники; 7 – карусель; 8 – піддони; 9 – яруси; 10 – щілини; 11 – каркас; 12 – НВЧ генератори; 13 – НВЧ розгалужувач; 14 – магнетрон; 15 – привідна станція.

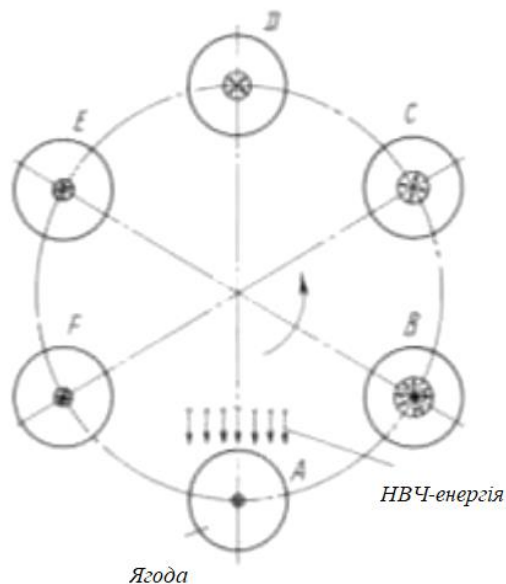


Рисунок 1.13 – Сушарка для плодово-ягідної сировини:  
 А, В, С, D, E, F – умовні положення зон карусельної установки.

Ефективна установка для сушіння при комбінації НВЧ та конвективного підведення теплової енергії дає можливість зростання якісних показників готової сухої продукції та напівфабрикатів за умови раціонального термічного впливу на об'єкт зневоднення для зменшення витрат енергії видалення води. Чергування конвективного охолодження та мікрохвильового нагріву, та співвідношення їх тривалості обумовлено наступним. Спочатку волога видаляється з поверхні матеріалу, а далі інтенсивність процесу лімітується швидкістю внутрішнього перенесення тепла на речовини, при цьому визначальними є швидкість сушильного агенту та параметри НВЧ нагрівання.

Незважаючи на широкий спектр переваг розпилювальної сушильної технології, слід зазначити, ряд її недоліків:

- великі габаритні розміри апаратів, які зумовлені параметричними характеристиками факела розпилення та потокові витрати контактуючих фаз, аеродинамікою їх контакту та тривалістю видалення вологи із рослинної сировини;
- складність вузлів розпилення та обладнання для уловлювання сухих тонкодисперсних частинок, і, як наслідок, їх висока вартість;
- лімітований час витання частинок матеріалів, що висушуються, у зоні сушіння.

## РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АПАРАТУ ДЛЯ СУШІННЯ ІМБИРУ

### 2.1 Конвективне сушіння імбиру із додатковим підведенням ІЧ-енергії

Імбир – стародавнє квітуха рослина, яка використовується і як пряність, і як ліки. Він має зігріваючий землистий смак як з прямими, так і з солодкими нотками. Імбир не тільки додає смаку страві, але й його потужні антиоксидантні властивості оздоровлюють як тіло, так і розум. Один з найпростіших способів зберігання імбиру в сушеному і подрібненому вигляді. Імбир є не лише лікарським засобом, а й однією з найпоширеніших спецій, яка широко реалізується на світових ринках. Крім того, він має унікальну композицію смакових та лікувально-профілактичних властивостей.

Завдяки високому вмісту вологи свіжий імбир є швидкопсувним, що зумовлює необхідність розробки методів консервування для продовження терміну його зберігання та полегшення транспортування на далекі відстані. Конвективне сушіння – популярний метод сушіння імбиру, який передбачає рух гарячого повітря над продуктом для полегшення випаровування вологи.

Леткий вміст олії та антиоксидантна здатність є іншими важливими якостями сушеного імбиру, оскільки вони безпосередньо пов'язані з його смаком та терапевтичною цінністю. Антиоксидантна активність скибочок імбиру зростає зі зниженням температури сушіння. Проте, навпаки, вищі температури призводять до значної втрати вмісту летких речовин у олії, що говорить про те, що нижчі температури сушіння можуть бути кращими для збереження біологічно активних сполук в імбирі.

При переробці рослинних сировинних матеріалів широко застосовуються механічні процеси, такі як подрібнення, гомогенізація, механічна активація сировини, внаслідок яких змінюються структурно-механічні та гігроскопічні властивості об'єктів обробки, що впливає на параметри перебігу процесів перенесення тепла та маси.

Технологічний ланцюг виробництва імбиру включає наступне основне обладнання (рис. 2.1):

- машину для миття та очищення (миття сировини та виділення забруднень зі шкіри);
- машину для нарізки імбиру (нарізка імбиру скибочками товщиною 3-5 мм, отримані шматочки однакові за розміром та товщиною, задля отримання рівномірного висихання);
- сушильну машину (поміщаються лотки на сушарку з тепловим насосом, сушка відбувається при 50°C-80°C протягом 10-18 годин, потім на конвеєр подачі стрічки безперервної сітчастої сушарки, сушка відбувається при

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Калмиков</i>			<b>Удосконалення апарату для сушіння екстракту кореня імбиру</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					19	11
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>			<b>ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО</b>			
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

температурі 75°C-110°C протягом 2-3 годин);

– машину для повітряного охолодження (охолодження імбирних чіпсів до кімнатної температури);

– м'ясорубку (подрібнює до імбирного порошку).



Свіжий імбир



Вимитий імбир



Нарізаний імбир



Сушка імбиру



Сушені чіпси імбиру



Імбирний порошок

Рисунок 2.1 – Технологічні операції у процесі виробництва імбиру

У сушильній шафі гаряче повітря виводиться знизу. Здійснюється сильна циркуляція повітря, відсутній мертвий кут при сушінні, повітря проходить крізь сировину. Сировина, яка підлягає сушінню не потребує перевертання [2, 7]. Оскільки сушильна машина використовує середню температуру для сушіння, тому вона може сушити різні види сировини, такі як фрукти та овочі, за один і той же час. Має 15/18/40/60 лотків всередині, матеріал лотка може бути пластиком (рис. 2.2). Технічні характеристики апарату для сушіння моделі ВХ-ЗР-К подано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики сушильної шафи

Модель ВХ-ЗР-К	15 лотків	18 лотків	40 лотків	60 лотків
Номінальна потужність (50°C), кВт	1	2,8	3,5	3,5
Номінальний струм, (50°C), А	5	8,5	15,5	15,5
Максимально споживаєма	2	5	7,5	7,5



вмісту поживних речовин, ніж звичайне конвективне сушіння. Поєднання інфрачервоного та конвективного сушіння значно скорочує час сушіння без шкоди для якості продукції. Вакуумне конвективне сушіння імбиру призводить до більшого збереження леткого вмісту олії та кращого збереження кольору порівняно з традиційним конвективним сушінням.

Для підвищення ефективності технології сушіння розробляються конструкції та вузли сушильних агрегатів для матеріалів на рослинній основі. Тому, вважається перспективним комбінація конвективного з інфрачервоним підведенням теплової енергії, що дасть можливість «пом'якшити» здійснення видалення вологи, і, як наслідок, зберегти якісні параметри імбиру. Інфрачервоне випромінювання буде передаватися від нагрівальних елементів (ламп) до поверхні імбиру, при цьому промениста енергія проникатиме в сировину і буде перетворюватися в теплову, тобто відбувається тепло і вологоперенесення в камері, на поверхні та всередині імбиру.

## 2.1 Оптимізація процесу конвективного сушіння імбиру

Цінність імбиру з фармацевтичної точки зору зумовлена вмістом у ньому різних бета-каротинів та кислоти, а також усіх незамінних амінокислот, магнієвих, кальцієвих та фосфорних солей, вітамінний комплекс. Імбир та екстракт з його кореня має різну вологість (рис. 2.3). Завдяки високому вмісту вологи свіжий імбир є швидкопсувним, що зумовлює необхідність розробки методів консервування для продовження терміну його зберігання та полегшення транспортування на далекі відстані.



Рисунок 2.3 – Свіжий імбир

Численні дослідження були зосереджені на аналізі кінетики сушіння та розробці математичних моделей конвективного сушіння кореневищ імбиру. Оптимізація конвективних умов сушіння кореневищ імбиру має вирішальне значення для балансу енергоефективності та якості продукції.

Процес сушіння кореневищ імбиру можна розділити на три окремі фази [5, 7, 9, 12].

Перша фаза, відома як фаза попереднього нагрівання. Вона передбачає нагрівання кореневищ імбиру відповідно до температури навколишнього повітря. На цьому етапі видалення вологи із сировини відбувається повільно, оскільки більша частина теплової енергії використовується для підвищення температури імбиру.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Друга фаза, фаза висихання з постійною швидкістю. Виникає коли зовнішні чинники, такі як вологість, температура та швидкість повітря, регулюють постійну швидкість видалення вологи з кореневищ імбиру. Цей період характеризується прямою лінією на кривій висихання, оскільки відбувається безперервне випаровування поверхневої вологи.

Третя фаза висихання характеризується швидкістю висихання, що збуває у процесі сушіння, коли випаровування вологи проникає всередину продукту, спостерігається знижений вміст вологи та поступове зменшення швидкості видалення вологи.

Поверхня імбиру вкрита суцільним шаром вологи. У цьому випадку процес масопереносу аналогічний випаровуванню з вільної поверхні рідини. При додатковому підведенні ІЧ-енергії швидкість масоуносу не залишається постійною, а зростає пропорційно величині поглинаємої потужності ІЧ-випромінювання. У зв'язку з цим, цей період називатимемо періодом умовно постійної швидкості осушення.

Осередкове випаровування – процес масоуносу при якому відбувається частково з вільної змоченої поверхні, а частково з осушеної, а рівень рідини в капілярах збігається з видимою геометричною поверхнею тіла [1, 7, 9]. Поверхня випаровування переміщується всередину, в глибину матеріалу з утворенням прошарку, що є додатковим опором для перенесення теплоти із зсередини продукту. Таким чином, загальне завдання моделювання процесів тепломасопереносу при конвективному сушінні продуктів з додатковим підведенням ІЧ енергії складається з двох складових.

Перша математична модель описує період умовно постійної швидкості осушення і пов'язана з винесенням вільної вологи з поверхні імбиру до досягнення повітряно-сухого рівноважного стану. Друга математична модель описує період швидкості, що збуває у процесі сушіння, коли випаровування вологи проникає всередину продукту.

*Період щодо постійної швидкості сушіння.* У цей період вологий матеріал – імбир містить як пов'язану (гігроскопічну), так і вільну вологу і тому носить назву мокрого або сирого матеріалу. Завдання осушення зводиться до видалення вільної вологи.

При обтіканні поверхні імбиру потоком теплоносія в прошарку виникають градієнти швидкості, температури та вмісту вологи. Диференціальні рівняння переносу для теплоносія можуть бути записані в наступному вигляді.

Рівняння перенесення маси [9]

$$\frac{\partial U_T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial U_T}{\partial x} + V_z \frac{\partial U_T}{\partial z} = a_m^T \left( \frac{\partial^2 U_T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U_T}{\partial x^2} \right) + a_m^T \delta_T \left( \frac{\partial^2 t_T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial x^2} \right),$$

де  $U_T$  – питомий вологовміст теплоносія;

$V_x$  – поздовжня швидкість обтікання сировини, м/с;

$x$  – поздовжня координата, м;

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$z$  – поперечна координата, нормальна до поверхні сировини, м;  
 $V_z$  – компонента швидкості, нормальна до поверхні сировини, м/с;  
 $a_m^T$  – коефіцієнт масопровідності (дифузії), м<sup>2</sup>/с;  
 $\delta_T$  – термоградієнтний коефіцієнт, К<sup>-1</sup>;  
 $t_T$  – температура теплоносія, К;  
 $G_{вл}$ ,  $G_c$  – маса вологи та сухого повітря, кг.

Рівняння перенесення теплоти [9]

$$\frac{\partial t_T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial t_T}{\partial x} + V_z \frac{\partial t_T}{\partial z} = a_T \left( \frac{\partial^2 t_T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial x^2} \right) + \frac{\varepsilon \cdot r}{c_T} \frac{\partial U_T}{\partial \tau} + \frac{q}{c_T \rho_T}$$

де  $a_T$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho_T$  – щільність теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_T$  – питома теплоємність, Дж/кг К;  
 $q$  – об'ємна потужність інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, Вт/м<sup>3</sup>;  
 $r$  – питома теплота випаровування води, Дж/кг;  
 $\varepsilon$  – коефіцієнт фазового переходу.

Щільність потоку маси визначається механізмом переміщення вологи усередині матеріалу у вигляді пари та механізмом переміщення вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище через утворений прошарок при природній або вимушеній конвекції, а також енергетикою випаровування (питома теплота випаровування, структура, розмір та форма капілярів, енергія зв'язку вологи).

Крім контролю за вмістом вологи, важливим є швидкість висихання і загальна швидкість висихання імбиру в процесі конвективного сушіння. Швидкість сушіння, яка зазвичай виражається у вологості, що видаляється за одиницю часу, є важливим параметром, який дає уявлення про ефективність процесу сушіння. На нього можуть впливати різні фактори, такі як температура, вологість, швидкість повітря, а також розмір і форма висушеного матеріалу.

Загальна швидкість сушіння враховує загальний час сушіння, що представляє собою середню швидкість видалення вологи за весь період сушіння. Це важливий параметр, оскільки він дає нам повне розуміння ефективності процесу сушіння.

Досліджуючи як миттєву, так і загальну швидкість сушіння, ми можемо визначити етапи процесу сушіння та зрозуміти зміни динаміки сушіння з часом. Ці знання мають вирішальне значення для оптимізації процедур сушіння, зменшення споживання енергії та підтримки високої якості при сушінні імбиру. Ці параметри в поєднанні з вмістом вологи, як на вологій, так і на сухій основі, дадуть повну картину характеристик сушіння кореневищ імбиру, що призведе до кращого розуміння процесу конвективного сушіння.

Математичне представлення вологості (%) розрахунку [10]

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



$$M_B = \frac{\text{маса води}}{\text{маса сухих речовин} + \text{маса води}}$$

$$M_B = \frac{m_{\Pi} - m_{\text{к}}}{m_{\Pi}}$$

де  $M_B$  – вологість, %

$m_{\Pi}$  – початкова маса нарізаного імбиру, г.

$m_{\text{к}}$  – кінцева маса нарізаного продукту, г.

Вміст води  $M_{\text{ВВ}}$  – це кількість води в одиниці маси сухих речовин у зразку. Таким чином загальний вираз для щільності потоку води в капілярно-пористому тілі записується у вигляді співвідношення:

$$M_B = \frac{\text{маса води}}{\text{маса сухих речовин}}$$

$$M_{\text{ВВ}} = \frac{m_{\Pi} - m_{\text{к}}}{m_{\text{к}}}$$

Розрахунок швидкостей сушіння в різний час протягом усього процесу сушіння в камері навколишнього середовища проводився за наступною формулою:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_0 - M_t}{t}$$

де  $\frac{dM}{dt}$  – швидкість висихання (кг води/кг сиров. хв.),

$t$  – час (хв),

$M_0$  – початкова вологість

$M_t$  – кінцева вологість.

Вплив швидкості і температури повітря на сумарну швидкість сушіння визначається за допомогою методу дисперсійного аналізу. Загальна швидкість висихання – це різницеве співвідношення між початковим і кінцевим вмістом води і загальним періодом сушіння. Розрахунок загальної швидкості висихання виглядає наступним чином [10]

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_0 - M_F}{t_1}$$

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

При вивченні процесу сушіння імбиру важливим фактором є вміст вологи. Вміст вологи в сировині є життєво важливим параметром у вивченні кінетики сушіння, що значно впливає на якість, безпеку та термін придатності кінцевого продукту. Зазвичай він представлений двома способами: на мокрій основі і на сухій основі.

Вміст вологи на вологій основі визначається як маса води, яка присутня в матеріалі, виражена у відсотках від загальної маси матеріалу (тобто сума сухої речовини та вмісту води). Він безпосередньо відображає, скільки води присутньо порівняно із загальною вагою, що робить його легким для розуміння та використання в практичних цілях. З іншого боку, вміст вологи на сухій основі визначається як маса води, присутньої в матеріалі, виражена у відсотках від маси сухої речовини. Це особливо корисно в розрахунках, щодо вмісту води незалежно від будь-яких змін у сухій речовині.

Вміст вологи в сухому вигляді може перевищувати 100% через те, що об'єм води в зразку може бути більшим, ніж кількість присутніх сухих твердих речовин. Суха основа зазвичай використовується для оцінки відсотка вологості матеріалу без вологи, за умови, що він не втрачає масу в процесі сушіння. Ця концепція сухої речовини забезпечує баланс маси протягом усього процесу сушіння [10]

$$j = -a_m \rho_o \nabla U - a_m^t \rho_o \nabla t - a_m^p \rho_o \nabla P$$

де  $\rho_o$  – щільність вологи, кг/м<sup>3</sup>;

$a_m$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$a_m^t$  – коефіцієнт термодифузії,  $\frac{m^2}{c} \cdot \frac{1}{K}$ ;

$a_m^p$  – коефіцієнт бародифузії,  $\frac{m^2}{c} \cdot \frac{1}{Pa}$ ;

$|\nabla U| = \frac{\partial U}{\partial z}$  – градієнт вмісту вологи, 1/м;

$|\nabla t| = \frac{\partial t}{\partial z}$  – градієнт температури, К/м;

$|\nabla P| = \frac{\partial p}{\partial z}$  – градієнт тиску, Па/м.

Так як температура теплоносія в реальних умовах становить менше 80°C, то явищем бародифузії нехтуємо. Зміна температури поверхні осушувача становить величину близько 7°C, у зв'язку з чим компоненту термовологопровідності можна також опустити.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У такому разі, рівняння збереження енергії для осушувача плоского двовимірного об'єкта, в умовах нехтування термічним опором тонкої плівки вологи, може бути записано у вигляді [9]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{q}{c\rho}$$

де  $\rho$  – щільність сировини, кг/м<sup>3</sup>.

Для нашого випадку, з урахуванням фазового переходу при випаровуванні води з вільної поверхні, граничні умови третього роду для рівнянь набудуть у вигляді [9]

$$\lambda_m \cdot \delta_T \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_i + \lambda_m \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)_i = \beta \rho_i (U_{\text{п}} - U_{\text{т}}),$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_{\text{п}} + \alpha (t_{\text{т}} - t_{\text{п}}) = \beta r \rho_i \varepsilon (U_{\text{п}} - U_{\text{т}}),$$

де  $\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_{\text{п}}$  – потік теплоти за рахунок теплопровідності;

$\alpha (t_{\text{т}} - t_{\text{п}})$  – потік теплоти за рахунок теплообміну;

$\beta r \rho_i \varepsilon (U_{\text{п}} - U_{\text{т}})$  – потік теплоти за рахунок випаровування;

$\beta \rho_i (U_{\text{п}} - U_{\text{т}})$  – потік маси вологи, що випаровується

$\lambda_m \cdot \delta_T \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_i$  – потік маси, що випаровується за рахунок термовологопровідності;

$\lambda_m \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)_i$  – потік маси, що випаровується за рахунок вологопровідності (дифузії);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;

$\rho_o$  – щільність вологи, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, м/с;  $\frac{кг}{м \cdot с}$

$\lambda_m$  – коефіцієнт масопродності,  $\frac{кг}{м \cdot с}$

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

*Період спадання швидкості сушіння.* Необхідність розгляду цієї фази процесу сушіння обумовлена, як зазначалося раніше, наявністю об'єктів, що знаходяться в стадії не тільки першого, а й другого періоду – спадної швидкості сушіння, коли фронт випаровування проник усередину матеріалу по координаті  $z$ . У другому періоді сушіння видаляється гігроскопічна (пов'язана) волога, через те, що вся вільна волога з поверхні матеріалу видалена.

Таким чином, в умовах нехтування бародифузією, що рушить силою процесу масоуносу є градієнт вмісту вологи і температури. У цьому випадку спільна система рівнянь тепло- та масопереносу записується в наступному вигляді [9]

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + a_m \delta_i \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right),$$

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \varepsilon r\rho \frac{\partial U}{\partial \tau} + q,$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta_i$  – термоградієнтний коефіцієнт матеріалу, 1/К.

У початковий момент часу температуру  $t_H$  і вологовміст  $U_o(t)$  матеріалу імбиру приймаємо постійними [9]

$$t(z,0) = t_H = \text{const},$$

$$U(z;0) = U_o(t) = \text{const},$$

При цьому, слід мати на увазі, що  $U_o(t)$  – гігроскопічний вологовміст матеріалу, що встановився до моменту закінчення осушення вільної вологи з поверхні імбиру. Граничні умови можуть бути записані у вигляді [9]

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial U(0, \tau)}{\partial z} = 0,$$

$$t(\pm R, \tau) = t_o + a(v) e^{-\frac{b(v)}{\tau}} + c(\varphi) e^{-\frac{m(\varphi)}{\tau}},$$

$$a_m \rho_o \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right) \Big|_{z=\pm R} + a_m \rho_o \delta \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right) \Big|_{z=\pm R} + \beta \rho_o \varepsilon (U_{II} - U_T) = 0,$$

де  $a_m \rho_o \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right) \Big|_{z=\pm R}$  – дифузійний потік маси з поверхні сировини;

									ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ	Арк.
										28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$a_m \rho_o \delta \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right) \Big|_{z=\pm R}$  – потік маси за рахунок термовологопровідності;

$\beta \rho_o \varepsilon (U_{\text{п}} - U_{\text{т}})$  – потік маси за рахунок масообміну;

$\varphi$  – відносна вологість теплоносія;

$a(v)$ ,  $b(v)$ ,  $c(\varphi)$ ,  $m(\varphi)$  – емпіричні коефіцієнти.

Теплопровідність матеріалу визначається як кількість енергії, що передається в межах одиниці площі та товщини матеріалу за певний час. При цьому різниця температур між поверхнями, що ініціюють тепловий потік, становить одну одиницю температури.

Теплопровідність визначає такі особливості:

структура матеріалів;

вологість змісту (вологість);

щільність матеріалів;

температура і тиск (робочі налаштування).

Математичне представлення теплопровідності кореневищ імбиру [10]

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta T \cdot A}$$

де  $k$  – теплопровідність (Вт/(м К));

$G$  – потужність, Вт;

$\Delta T$  – зміна температури, Вт.

Теплопровідність зростає зі збільшенням вмісту вологи. Це підвищення теплопровідності з вмістом вологи пояснюється збільшенням молекул води в середовищі імбиру в міру зростання вмісту вологи, заповнюючи пори в зразку імбиру та посилюючи його здатність проводити більше тепла. Це свідчить про те, що споживання теплової енергії зразком є значно вищим при нижчих температурах. Однак тепла енергія зменшується при більш високому рівні температури через менший вміст вологи. Крім того, оскільки вода має вищу теплопровідність, ніж сушені скибочки імбиру, вона сприяє високій теплопровідності свіжого імбиру.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

## РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Удосконалення методів сушіння імбиру для отримання сухого екстракту

Залежність зміни вологості від часу висихання для зразків імбиру при різних температурах сушіння проводилося для небланшованого, бланшованого, очищеного, неочищеного імбиру.

*Бланшовані кореневища імбиру.* Бланшовані кореневища імбиру ненадовго піддавалися впливу окропу або пари, щоб частково розм'якшити тканину. Цей етап попередньої обробки може допомогти зберегти колір, покращити текстуру та продовжити термін зберігання висушеного продукту. Однак бланшування може спричинити деяку втрату летких сполук, характерний для імбиру аромат і смак.

*Небланшовані кореневища імбиру.* Небланшовані кореневища імбиру є сирими і не піддавалися термічній обробці перед сушінням. Вони зберігали свій первісний колір, аромат і смак, але можуть сушитися довше, ніж бланшовані зразки. Небланшовані зразки також можуть мати менший термін зберігання, ніж їх бланшовані аналоги.

*Очищені кореневища імбиру.* З очищених кореневищ імбиру видаляли зовнішню шкірку. Цей етап попередньої обробки може призвести до більш рівномірного процесу сушіння та покращення якості продукту, оскільки видалення шкірки може полегшити втрату вологи та покращити теплопередачу. Очищений імбир також може бути візуально привабливішим і його легше обробляти або подрібнювати після сушіння.

*Неочищені кореневища імбиру.* Неочищені кореневища імбиру мають неушкоджену зовнішню шкірку, що може уповільнити процес сушіння через додатковий шар, який волога має проникнути, щоб вийти. Це може призвести до збільшення часу висихання та нерівномірного висихання. Однак шкірка може зберегти частину аромату та смаку імбиру під час сушіння.

Зразки імбиру піддавали тепловому режиму обробки при температурах від 20°C до 60°C протягом різної тривалості (2, 4, 8, 10, 14, 16 год) з часом витримки 10 хв, починаючи з кімнатної температури в сушильній камері. Спочатку зразки були запрограмовані на роботу протягом 2, 4, 8 і 10 годин кожен. Корінь імбиру було нарізано на шматочки розміром 30 мм × 18 мм і піддавали сушінню в різних умовах (небланшовані, бланшовані, очищені, неочищені) при температурі від 20°C до 60°C з використанням сушильної шафи СП-300 з примусовою конвекцією, яка здійснює теплову обробку твердих зразків з визначенням вологості (рис. 3.1).

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Калмиков</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>					<i>3</i>	<i>8</i>
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				<b>ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО</b>		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>						



Рисунок 3.1 – Сушильна шафа СП-300

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики сушильної шафи СП-300

Модель СП-300	Показники
Об'єм, л	303
Номінальний струм, (50 <sup>0</sup> С), А	5
Мінімальна температура нагрівання, °С	+5
Максимальна температура нагрівання, °С	300
Потужність, Вт	3100
Номінальна напруга, В	220/380
Вага, кг	120

Як зазначалося раніше, процес сушіння імбиру можна розділити на три окремі фази:

– фаза попереднього нагрівання, яка передбачає нагрівання імбиру відповідно до температури навколишнього повітря. На цьому етапі видалення вологи зі сировини відбувається повільно, оскільки більша частина теплової енергії використовується для підвищення температури імбиру;

– фаза висихання з постійною швидкістю, виникає, коли зовнішні фактори, такі як вологість, температура та швидкість повітря регулюють постійну швидкість видалення вологи з імбиру. Цей період характеризується прямою лінією на кривій висихання, оскільки відбувається безперервне випаровування поверхневої вологи;

– фаза висихання характеризується швидкістю висихання, що убуває в процесі сушіння, коли випаровування вологи проникає всередину продукту, спостерігається знижений вміст вологи та поступове зменшення швидкості видалення вологи.

Імбир має помітно високий початковий вміст вологи. Визначення цієї початкової вологості має вирішальне значення, оскільки вона безпосередньо впливає на різні аспекти процесу сушіння. Швидкість висихання збільшується з

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

підвищенням температури сушіння. Таким чином, визначення початкової вологості та оцінка вмісту води на різних етапах є дуже важливою.

Теплопровідність зростає зі збільшенням вмісту води. Це підвищення теплопровідності з вмістом води можна пояснити збільшенням молекул води в зразку імбиру в міру зростання вмісту води, заповнюючи пори в зразку імбиру та посилюючи його здатність проводити більше тепла. Це свідчить про те, що споживання теплової енергії була значно вища при нижчих температурах. Однак тепла енергія зменшувалася при більш високому рівні температури через менший вміст води. Крім того, оскільки вода має вищу теплопровідність, ніж сушені кореневища імбиру, вона сприяє високій теплопровідності свіжого імбиру (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Прилад для вимірювання теплопровідності MIT-1

Зі збільшенням вмісту води висихання імбиру швидко призводить до затвердіння поверхні. Це явище зменшує показник теплопровідності, що пов'язано з тим, що затверділа поверхня є поганим провідником тепла.

Сушіння є важливим процесом для зберігання імбиру, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту. Температура сушильного повітря відіграє значну роль у формуванні кривих сушіння та визначенні якості сушеного імбиру. Отримання інформації про те, як температура сушильного повітря впливає на кінетику сушіння та якісні характеристики є важливою для оптимізації процедури сушіння.

Підвищення температури сушильного повітря призводить до збільшення швидкості сушіння, головним чином через посилений тепло- та масообмін між сировиною та навколишнім повітрям. При більш високих температурах криві сушіння зазвичай відображають швидку початкову швидкість сушіння, яка потім переходить до більш повільної, що характеризується стійким зниженням вмісту води. Це призводить до скорочення тривалості сушіння, що є плюсом для великомасштабної обробки та енергоефективності.



Однак надмірно високі температури сушіння можуть спричинити затвердіння сировини, коли зовнішня поверхня імбиру висихає швидше, ніж внутрішня, утворюючи затверділу оболонку, яка перешкоджає додатковому вилученню вологи. Це може подовжити тривалість сушіння та призвести до нерівномірного висихання, що негативно вплине на якість кінцевого продукту.

*Вплив сушіння на якість кореневищ імбиру.* Температура сушильного повітря значно впливає на якість сушеного імбиру. Сушіння може змінити важливі якісні характеристики, такі як колір, аромат, смак і текстура.

*Колір.* Підвищена температура сушіння може спричинити потемніння або знебарвлення імбиру, потемніння або окислення пігменту.

*Аромат і смак.* Процедура сушіння може призвести до втрати летких сполук, відповідальних за унікальний аромат і смак імбиру. Більш високі температури можуть посилити ці втрати, роблячи кінцевий продукт менш ароматним і духмяним.

*Текстура.* Високі температури сушіння можуть спричинити затвердіння сировини, що впливатиме на текстуру сушеного імбиру ускладнюючи їх подальше подрібнення чи обробку.

Дотримання балансу між температурою сушильного повітря та тривалістю сушіння має вирішальне значення для оптимізації процесу сушіння зі збереженням якості сушеного імбиру. Вибравши відповідну температуру сушіння, можна мінімізувати погіршення якості, максимізуючи ефективність сушіння та енергозбереження.

Вміст вологи істотно впливає на теплові властивості сушеного імбиру. Оскільки вміст вологи в сировині змінюється протягом процесу сушіння, а їх теплові властивості, такі як теплопровідність, питома теплоємність і термодифузійність також змінюються. Розуміння впливу вмісту вологи на ці властивості є важливим для удосконалення методів сушіння та прогнозування моделей сушіння.

*Теплопровідність.* Теплопровідність імбиру сильно корелює з вмістом вологи. Більш високий вміст вологи зазвичай призводить до більш високих значень теплопровідності, оскільки вода є більш ефективним провідником тепла, ніж тверді елементи імбиру. Оскільки вміст вологи зменшується в процесі сушіння, теплопровідність висушеного імбиру також зменшується. Ця зміна теплопровідності може вплинути на теплопередачу та загальну швидкість сушіння, впливаючи на тривалість сушіння та використання енергії.

*Питома теплоємність.* Питома теплоємність позначає кількість теплоти, необхідної для підвищення температури одиниці маси речовини на один градус Цельсія. Вміст вологи впливає на питому теплоємність кореневищ імбиру, враховуючи, що вода має більш високу питому теплоємність, ніж тверді складові. У міру того, як вміст вологи зменшується, питома теплоємність висушених кореневищ імбиру також зменшується, перетворюючись на меншу кількість тепла, необхідного для підвищення температури матеріалу під час сушіння.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

*Термодифузія.* Термодифузія оцінює швидкість з якою тепло може поширюватися через матеріал. На неї впливає теплопровідність матеріалу, питома теплоємність і щільність. У міру того, як вміст вологи в імбирі зменшується, теплопровідність і питома теплоємність знижуються, а щільність зростає. Ці зміни можуть зменшити термічну дифузію, що означає, що передача тепла через висушені кореневища імбирі стає менш ефективною в міру просування процесу сушіння.

Таким чином, вміст вологи в імбирі має помітний вплив на їх теплові властивості, які охоплюють теплопровідність, питому теплоємність і термодифузію. Розуміння взаємозв'язку між вмістом вологи та термічними властивостями є важливим для удосконалення методів сушіння, мінімізації використання енергії та збереження якості кінцевого висушеного продукту.

Імбир – широко споживана спеція, яка охоплює різні сорти, що культивуються в усьому світі. Різні умови вирощування, клімат сприяють відмінностям у характеристиках сушіння, які спостерігаються серед кореневищ імбирі з різних сортів. Характеристики сушіння імбирі можуть змінюватися залежно від сорту та умов, в яких він вирощується. Кілька факторів, таких як початковий вміст вологи, товщина шкіри та властиві є досить важливими.

*Початковий вміст вологи.* Початковий вміст вологи суттєво впливає на процес сушіння, включаючи необхідний час сушіння та відповідний спосіб сушіння. Більш високий вміст вологи, як правило, вимагає більш тривалих періодів сушіння або більш інтенсивних методів сушіння. Різні сорти імбирі можуть демонструвати різний вміст вологи, що впливатиме на його характеристики сушіння.

*Товщина шкірки.* Товщина шкірки імбирі також впливає на процес сушіння. Більш товста шкірка може перешкоджати випаровуванню вологи під час сушіння, подовжуючи час висихання. Крім того, товщина шкірки може впливати на важливі аспекти якості висушеного продукту, такі як його колір, текстура та смак.

*Властиві сировини.* Кожен сорт імбирі має свої властивості, включаючи розмір, форму, щільність, вміст олії та хімічний склад. Ці властивості можуть істотно впливати на швидкість і ефективність процесу сушіння. Наприклад, кореневища імбирі з більшим вмістом олії, як правило, висихають повільніше, а більшим або щільнішим кореневищам може знадобитися більше часу для висихання, ніж меншим або менш щільним.

*Час висихання.* Імбир демонструє типову криву висихання зі швидкою початковою швидкістю висихання та з подальшим уповільненням, більш поступовим зниженням вмісту вологи. Однак, інші види імбирі можуть мати коротший час висихання, через тоншу шкірку та нижчий початковий вміст вологи. Навпаки, сорти з вищим початковим вмістом вологи або товстішою шкіркою можуть вимагати довшого часу висихання, щоб досягти бажаного кінцевого рівня вологості.

*Споживання енергії.* Споживання енергії під час процесу сушіння залежить від таких факторів, як початковий вміст вологи, температура сушіння та швидкість повітря. Кореневища імбирі споживають менше енергії під час

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

сушіння, ніж інші сорти з вищим початковим вмістом води або ті, які вимагають вищих температур сушіння для досягнення подібних швидкостей сушіння.

*Якість продукції.* На якість сушеного імбиру впливають умови сушіння, технології обробки та сорт. Імбир відомий своїм різким ароматом і високим вмістом олеорезину, що сприяє їх бажаному смаку та лікувальним властивостям. Хоча процес сушіння може призвести до деякої втрати летких сполук, якість імбиру можна підтримувати, оптимізуючи умови сушіння, такі як температура та швидкість повітря, щоб мінімізувати ці втрати. Інші сорти можуть демонструвати інші якісні характеристики, що також слід враховувати при оптимізації процесів сушіння. Характеристики сушіння імбиру відрізняються від характеристик інших сортів через такі фактори, як початковий вміст води, товщина шкірки та інші властивості. Розуміння цих відмінностей має важливе значення для оптимізації процесів сушіння та забезпечення високоякісних імбирних продуктів.

Температура сушильного повітря відіграє вирішальну роль у процесі сушіння імбиру. Крива сушіння відображає співвідношення вмісту води в продукті з часом сушіння, вказуючи, як швидко сировина висихає за певних умов (рис. 3.3, рис.3.4).

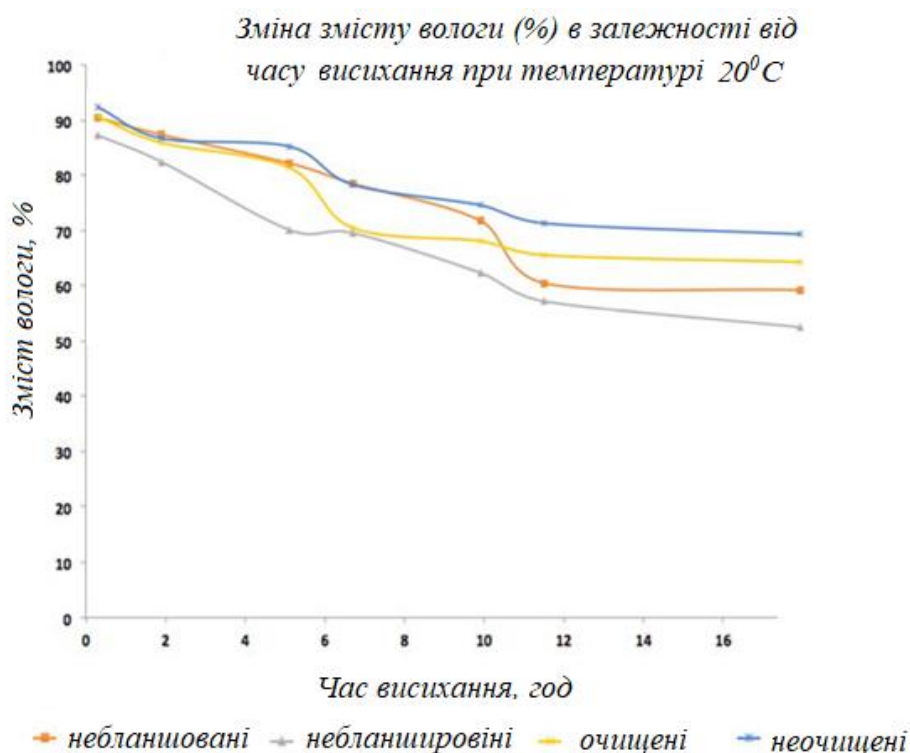


Рисунок 3.3 – Графіки зміни вологості (%) з часом висихання (година) для кореневищ імбиру при температурі 20°C

Зі збільшенням температури сушильного повітря швидкість випаровування, як правило, зростає, що призводить до більш крутої кривої сушіння. Це свідчить про більш швидке зниження вмісту води з часом. Тому вищі температури часто призводять до скорочення часу висихання.

Однак залежність між температурою сушильного повітря і кривою сушіння не є строго лінійною. Коли температура піднімається вище певної точки, швидкість видалення вологи зменшується через внутрішні обмеження сировини, такі як швидкість дифузії води на поверхню. Тому оптимальна температура сушильного повітря зазвичай максимізує швидкість видалення вологи без негативного впливу на якість продукту.

Оптимальною температурою повітря для сушіння було встановлено 60°C. При такій температурі процес конвективного сушіння ефективно знижував вологість кореневищ при збереженні їх якості, що зображується збалансованою кривою сушіння. Крім того, надмірно висока температура сушильного повітря може погіршити якість продукту, спричиняючи зміни кольору, текстури та поживної цінності, тим самим впливаючи на загальну якість сировини. Отже, баланс між швидкістю сушіння і підтриманням якості продукції є важливим при визначенні оптимальної температури сушильного повітря.

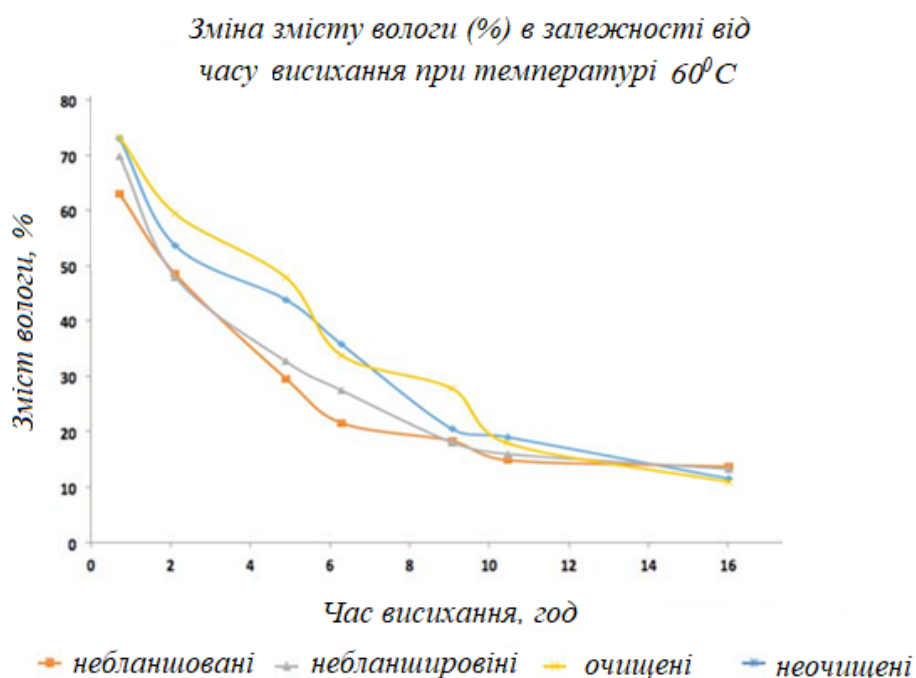


Рисунок 3.4 – Графіки зміни вологості (%) з часом висихання (година) для кореневищ імбиру при температурі 60°C

Імбир демонструє типову криву висихання зі швидкою початковою швидкістю висихання та з подальшим уповільненням, більш поступовим зниженням вмісту вологи. Зневоднення імбиру, особливо при більш низьких температурах від 10°C до 20°C є досить незначним, незважаючи на постійну вологість, що підтримується при сушінні. Криві сушіння при різних температурах повітря також дають цінну інформацію про енергоефективність процесу сушіння. Аналіз цих кривих дозволяє точно налаштувати процес сушіння, щоб забезпечити мінімальне споживання енергії при досягненні бажаного кінцевого вмісту вологи.

Ефективність конвективного методу сушіння виділяється серед інших методів, таких як тунельне сушіння. При сушінні імбиру досягається оптимальна сухість за 16 години. Температура сушіння 60°C ідеально підходить для збереження якості кореневищ імбиру, забезпечуючи при цьому енергоефективність. Імбир дуже чутливий до температури, а оптимальне сушіння досягається при 60 °C і для збереження якості продукту є гарним результатом. Імбир, висушений до середнього вмісту вологи 10%, придатний для зберігання та перетворення на лікувальний та оздоровчий порошок.

Що стосується кольору, то більш висока температура сушіння, що не перевищує 60 °C, і нижчий кінцевий вміст вологи призвели до мінімального або взагалі не призвели до зміни кольору продукту. Термічна обробка призвела до змін у продукті, що призвело до появи різних фізичних структур через усадку, що вплинуло на загальні форми та розміри після сушіння. Ця зміна була особливо помітна в бланшованому, небланшованому, очищеному та неочищеному імбирі при температурі від 40°C до 60°C. Причому, бланшований імбир показав найпомітніші зміни. Неочищений нарізаний імбир продемонстрував тенденцію до збільшення вмісту вологи зі збільшенням температури та часу сушіння.

Наведені вище результати описують як змінюється вміст вологи в кореневищах імбиру – у небланшованих, бланшованих, очищених і неочищених формах під час сушіння при різних температурах. Зі збільшенням температури процесу сушіння від 20°C до 60°C вміст вологи в кожному виді кореневища імбиру зменшується. Ця закономірність спостерігається у всіх зразках імбиру (небланшований, бланшований, очищений та неочищений). Конкретні значення варіюються, але тенденція залишається незмінною: з підвищенням температури вміст вологи зменшується.

Важливо зазначити, що процес сушіння та подальше зменшення вмісту вологи може вплинути на текстуру, смак і теплопровідність імбиру, тому цей процес необхідно контролювати в харчовій промисловості.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

## ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена удосконаленню процесу та апарату для сушіння екстракту кореня імбиру. У роботі зазначено, що імбир – стародавня квітуча рослина, яка використовується і як пряність, і як ліки. Він має зігріваючий землистий смак як з прямими, так і з солодкими нотками. Імбир не тільки додає смаку страві, але й має потужні антиоксидантні оздоровчі властивості. Імбир є не лише лікарським засобом, а й однією з найпоширеніших спецій, яка широко реалізується на світових ринках. Він має унікальну композицію смакових та лікувально-профілактичних властивостей. Завдяки високому вмісту вологи свіжий імбир швидко псується, що зумовлює необхідність удосконалення методів сушіння, які сприятимуть збільшенню термінів його зберігання та полегшення транспортування на далекі відстані.

У першому розділі здійснено аналітичний огляд обладнання для сушіння рослинної сировини. Зазначено, що псування харчових продуктів відноситься до незворотних змін у харчових продуктах, які стають неїстівними. Псування їжі можна запобігти шляхом упровадження деяких способів консервування, одним з яких є сушіння. Сушіння – це процес видалення води задля запобігання росту мікроорганізмів, які можуть викликати процес гниття. Процес сушіння може мінімізувати побічні реакції, опосередковані при наявності води. У процесі огляду методів сушіння, зазначено, що на сьогодні актуальними є нові методи сушіння та гібридні системи сушіння для підвищення ефективності та якості конвективного сушіння кореневищ імбиру. Ці методи включають конвективне сушіння за допомогою мікрохвильової печі, інфрачервоне конвективне сушіння та вакуумне конвективне сушіння.

На основі аналізу було виявлено, що незважаючи на широкий спектр переваг сушильної технології є ряд її недоліків, а саме: великі габаритні розміри апаратів, які зумовлені параметричними характеристиками; складність вузлів розпилення та обладнання для уловлювання сухих тонкодисперсних частинок, і, як наслідок, їх висока вартість, лімітований час витання частинок матеріалів, що висушуються в зоні сушіння.

Другий розділ присвячено удосконаленню апарату для сушіння імбиру. Зазначено, що комбіноване мікрохвильове конвективне сушіння призводить до скорочення часу сушіння та кращого збереження кольору та вмісту поживних речовин, ніж звичайне конвективне сушіння. Поєднання інфрачервоного та конвективного сушіння значно скорочує час сушіння без шкоди для якості продукції. Вакуумне конвективне сушіння імбиру призводить до більшого збереження леткого вмісту олії та кращого збереження кольору порівняно з традиційним конвективним сушінням.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Калмиков</i>				<b>Удосконалення апарату для сушіння екстракту кореня імбиру</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>						<i>38</i>	<i>2</i>
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					<b>ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО</b>		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>							

Розглянуто технологічний ланцюг виробництва сушіння імбиру, який включає наступне основне обладнання: машину для миття та очищення, машину для нарізки імбиру, сушильну машину, машину для повітряного охолодження (охолодження імбирних чіпсів до кімнатної температури), м'ясорубку. Розглянуто апарат для сушіння рослинної сировини. Запропоновано для «пом'якшення» здійснення видалення вологи, і, як наслідок, збереження якісних параметрів імбиру застосовувати поєднання конвективного з інфрачервоним підведенням теплової енергії. Інфрачервоне випромінювання буде передаватися від нагрівальних елементів до поверхні імбиру, при цьому промениста енергія проникатиме в сировину і буде перетворюватися в теплову, тобто відбувається тепло і вологоперенесення в камері на поверхні та всередині імбиру.

Зазначено, що процес сушіння кореневищ імбиру можна розділити на три окремі фази. Перша фаза – фаза попереднього нагрівання, яка передбачає нагрівання імбиру відповідно до температури навколишнього повітря. На цьому етапі видалення вологи із сировини відбувається повільно, оскільки більша частина теплової енергії використовується для підвищення температури імбиру. Друга фаза – фаза висихання з постійною швидкістю, виникає, коли зовнішні чинники, такі як вологість, температура та швидкість повітря, регулюють постійну швидкість видалення вологи з імбиру. Третя фаза висихання характеризується швидкістю висихання, що убуває у процесі сушіння, коли випаровування вологи проникає всередину продукту, спостерігається знижений вміст вологи та поступове зменшення швидкості видалення вологи.

У третьому розділі зазначено, що баланс між швидкістю сушіння і підтриманням якості продукції є важливим при визначенні оптимальної температури сушильного повітря. Було розглянуто залежність зміни вологості від часу висихання для зразків імбиру при різних температурах сушіння. Дослідження проводилося для небланшованого, бланшованого, очищеного, неочищеного імбиру. Зразки імбиру піддавали тепловому режиму обробки при температурах від 20°C до 60°C протягом різної тривалості (2, 4, 8, 10, 14, 16 год). Корінь імбиру було нарізано на шматочки розміром 30 мм × 18 мм і піддавали сушінню в різних умовах та при різних температурах з використанням сушильної шафи СП-300 з примусовою конвенцією, яка здійснює теплову обробку твердих зразків з визначення вологості.

Визначено, що оптимальною температурою повітря для сушіння є 60°C. При такій температурі процес конвективного сушіння ефективно знижував вологість сировини при збереженні її якості, що зображується збалансованою кривою сушіння. Крім того, надмірно висока температура сушильного повітря може погіршити якість продукту, спричиняючи зміни кольору, текстури та поживної цінності, тим самим впливаючи на загальну якість сировини.

Зі збільшенням температури процесу сушіння від 20°C до 60°C вміст вологи в кожному зразку імбиру зменшується. Ця закономірність спостерігається для небланшованого, бланшованого, очищеного та неочищеного імбиру. Конкретні значення варіюються, але тенденція залишається незмінною: з підвищенням температури вміст вологи зменшується.

					<b>ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини: навч. посібник. Х.: ХДУХТ. 2015. 159 с.
2. Снежкін Ю.Ф. Зниження енерговитрат при переробці фруктово-овочевої сировини. *Наук. праці ОНАХТ. Одеса*, 2006. Вип. 28. С. 71–73.
3. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.Ф. Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків. К.: Академперіодика, 2007. 162 с.
4. Kukadiya V.D., Gojiya D.K. Sojaliya H.R. Optimization of infrared-convective drying process of ginger slices using response surface method (RSM). *An International e-Journal*. 2016. Vol. 5. P. 39–51.
5. Rossi Indiarito, Fatsyarien Citra Angiputri Adiningsih, Ghina Almira Aulia. Conventional and advanced food-drying technology: a current review. *International journal of scientific & technology research*. 2021. Vol. 10. P. 99–107.
6. Tiwari A. Review on solar drying of agricultural produce. *Food Process Technol*. 2016. Vol. 7. P.1–12.
7. Topuz A. Feng H. and M. Kushad. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. *Food Sci. Technol*. 2009. Vol. 42. P. 1667–1673.
8. Богачук В.В., Мокін Б.І. Аналіз основних математичних моделей та похибок обчислення вихідних параметрів процесу сушки. *За матеріалами четвертої міжнародної науково-технічної конференції*. Том 1. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1997. С. 36–3.
9. Alibas I. Microwave, air and combined microwave-convective drying parameters of pumpkin slices. *LWT Food Sci. Technol*. 2007. Vol. 40. P. 1445–1451.
10. Doymaz I. Drying of ginger slices in a convective hot-air dryer. *Int. J. Food Sci. Technol*. 2011. Vol. 46. P. 602–607.
11. Mahapatra A., Lan Y., Harris D. Influence of moisture content and temperature on thermal conductivity and thermal diffusivity of rice flours. *Int. J. Food Prop*. 2011. Vol. 14. P. 675–683.
12. Сушіння овочів і плодів. Режим доступу: <https://foodtechnology.pro/tehnologiya-pererobky-plodiv-ta-ovochiv/sushinnya-ovochiv-plodiv>.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-22м.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40