

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 переробних та
харчових виробництв»
Цвіркун Л.О.
« ___ » _____ 2022р.

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних та харчових виробництв»

на тему: «Дослідження технології та розробка енергоефективного обладнання
для сублимації риби»

Виконав:

Здобувач вищої освіти Кухта Олександр Олександрович _____

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник

професор, днт. Хорольський Валентин Петрович _____

(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 _____

(підпис)

Кривий ріг
2022

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 переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми
«Обладнання переробних та
харчових виробництв»

Цвіркун Л.О.

« » 2022р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження технології та розробка енергоефективного обладнання для сублімації риби»

Керівник роботи професор, днт. Хорольский Валентин Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено: наказом першого проректора ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського від «24» червня 2022р. № № 136-с

2. Строк подання здобувачем ВО роботи «01» грудня 20 22р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Матеріали виробничої практики
2. Техніко-економічні показники підприємства Преміум снєк
3. Матеріали наукових журналів та еспрес інформація
4. матеріали монографій з питань обладнання сублімації риби патенти

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ
2. Розділ 1. Дослідження технології вакуумної-сублімаційної сушки
3. Розділ 2 Розгляд технології(конструкції) вакуумно-сублімаційної сушарки для риби
4. Розділ 3 Підвищення енергоефективності сушки риби в вакуумно-сублімаційній сушлики підвода тепла завдяки мікрохвильового модуля

5. Висновок

6. Дата видачі завдання «31» серпня 2022р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Проходження практики та збір вхідних даних	11.09.22
2	Погодження теми та змісту кваліфікаційної роботи	15.10.22
3	Розділ 1 та погодження з керівником	31.10.22
4	Розділ 2 та погодження з керівником	10.11.22
5	Розділ 3 та погодження з керівником	25.11.22
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	30.11.22

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Кухта О.О
(прізвище та ініціали)
Хорольский В.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи : покращення енергоефективності виробництва та якісних показників сушеної риби при сублімаційній сушці, за рахунок оптимізації технологічних процесів та роботи обладнання

Завдання роботи: дослідити технології сублімаційного сушіння, розглянути сучасні сублімаційні сушарки, розробити математичну модель процесу сублімації з теплопідвідом завдяки мікрохвильового модуля.

Об'єкт: Сублімаційна сушарка, мікрохвильовий модуль

Предмет: підвід тепла до філе сушеної риби за допомоги мікрохвильового модулю

Методи/методика, використані у кваліфікаційній роботі: аналіз технології сублімації та конструкції сублімаційної сушарки, математичне моделювання процесу сублімації завдяки підводу тепла через мікрохвильовий модуль.

Основні висновки та рекомендації: Застосування мікрохвильового модуля для підвода тепла в сушарку покращую якісні показники продукту та зменшує енергоспоживання. Дана робота надає підґрунтя для виконання конструкторської роботи мікрохвильового підводу до сублімаційної камери, також розробка управління мегатроном в процесі сублімації, розробка термодатчика для виміру температури продукту сушіння при впливі електромагнітного поля.

Ключові слова: вакуумно-сублімаційна сушарка, сублімаційна сушарка, сублімація, мікрохвильовий модуль, напруженість

Зміст

Зміст

Вступ	3
Розділ 1. Дослідження технології вакуумної-сублімаційної сушки	3
1.1 Фізичний опис процесу сублімації	3
1.2 Математичний опис механізму сублімації	6
Розділ 2. Розгляд технології(конструкції) вакуумно-сублімаційної сушарки для риби.	12
2.1 Розгляд загального виду конструкції вакуумно-сублімаційної сушарки	12
2.2 Конструкція основної вакуумно-сублімаційної сушилки для риби.....	15
2.3 Тепловий розрахунок.....	17
Розділ 3. Підвищення енергоефективності сушки риби в вакуумно-сублімаційній сушлики підвода тепла завдяки мікрохвильового модуля.....	20
3.1 Дослідження температурних параметрів мікрохвильового впливу на рибний продукт.....	20
3.2. Математичне моделювання первинної сублімації.....	22
3.3 Розробтка енергоефективного мікрохвильового обладнання для вакуумносублімаційної сушарки.....	31
Висновки	40
Список використаної літератури	<u>41</u>

					Д о н Н У Е Т. 133.Г М Б -21 м.2022. 3 М					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.	Кухта									
Перевір.	Хорольський									
Н. Контр.	Омельчинко									
Затверд.	Цвіркун									

Вступ

Нині одним найбільш прогресивним методом зберігання продуктів з найбільш повним збереженням корисних властивостей є метод вакуум-сублімаційної сушіння. Сублімаційна сушка характеризується як перехід вологи з попередньо замороженого продукту в пароподібний стан, при цьому, не переходячи в рідку фазу. Суть сублімаційного зневоднення продуктів – це заморожування та подальше висушування. Таким чином, вихідні властивості, такі як смак, зовнішній вигляд, запах, розмір і вміст поживних речовин залишається незмінним, і швидко відновлюються після сублімаційного зневоднення.

Завдяки сублімаційному сушінню, продукти набувають невеликої ваги, яка досить важлива для скорочення витрат на транспортування.

У цій роботі ми розглядаємо саме вакуумно-сублімаційне сушіння філе риби.

Сублімаційне сушіння харчових продуктів має ряд переваг:

- Зменшення ваги продукту;
- Відсутність потреби у холодильнику. Продукти після сублімаційного сушіння можуть тривалий час зберігатися без холодильника;
- Спрощена реалізація (продаж) продукту. Завдяки тривалості зберігання поза холодом, продукти можна реалізовувати у торгових точках, не забезпечених холодильниками;
- Відсутність потреби у холодильнику.

Одним із головних недоліків сублімації є не економічність, даний вид сушіння є досить дорогим.

Другим недоліком сублімації є наявність мікродисперсних трубок в сухому матеріалі, що робить його пористим.

Тому метою дипломної роботи є покращення енергоефективності виробництва та якісних показників сушеної риби при сублімаційній сушці, за рахунок оптимізації технологічних процесів та роботи обладнання.

Для цього було поставлені такі завдання як:

1. Розглянути фізичні та математичні процеси сублімації.
2. Дослідити існуючі конструкції вакуумно-сублімаційної сушарки.
3. Розрахувати тепловий баланс для сушіння рибного філе
4. Дослідження та створення математичного рівняння сублімації рибного продукту з мікрохвильовим підводом тепла.
5. Конструювання енергоефективної камери субліматора при підводі надвисоких частот для підігріву продукту.

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ВС			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Кухта				Вступ	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.	Хорольский							
Н. Контр.	Омельченко							
Затверд.	Цвіркун \							

Розділ 1. Дослідження технології вакуумної-сублімаційної сушки

1.1 Фізичний опис процесу сублімації

Сушіння - це процес видалення вологи з твердого або пастоподібного матеріалу шляхом випаровування рідини, що міститься в ньому за рахунок підведеного до матеріалу тепла. Метою сушіння є поліпшення якості матеріалу (зниження його об'ємної маси, підвищення міцності) і, у зв'язку з цим, збільшення можливості його використання.

Сушіння характеризується різною інтенсивністю переміщення вологи всередині матеріалу (вологопровідність) та подальшого її випаровування з поверхні (вологообмін). Головна трудність сушильного процесу полягає у переміщенні вологи із середньої зони сортименту. Ефективність сушіння багато в чому визначається можливістю оперативного управління цим процесом та підтримання режимних параметрів на заданому рівні

Одним із основних напрямків розвитку економіки нашої країни є використання високоінтенсивних та енергозберігаючих технологій, сучасного обладнання, що відповідає світовим стандартам. До таких технологій можна віднести консервування матеріалів методом вакуум-сублімаційного зневоднення (Ліофілізація). Ліофілізовані продукти харчування не змінюють свій колір і форму, не втрачають смакові та поживні речовини, а також є дуже хрусткими, тому ліофілізація є ідеальним способом сушіння продуктів харчування будь-якого типу. Тому в даний час виробництво сублімованих харчових продуктів є актуальним завданням.

Процес сублімаційного сушіння був винайдений в 1906 Жаком-Арсьє д'Арссовалем (який все життя займався електрофізіологією) і його асистентом Фредеріком Бордасом в лабораторії біофізики університету Collège de France в Парижі. У 1911 році Дауні Харріс і Шекл, які працювали в лабораторії фізіології Сент-Луїського університету, розробили метод сублімаційного сушіння для збереження вірусу сказу. Ця робота зрештою призвела до розробки першої вакцини від сказу.

Сучасну ліофілізацію було розроблено під час Другої світової війни. Особливо актуальним у цей період було завдання доставити сироватку крові для допомоги пораненим із США до Європи. Але через відсутність належного охолодження під час транспортування більша частина сироватки псувалася ще до того, як потрапляла до шпиталів. Процес сублімаційного сушіння був розроблений як комерційний метод, який дозволив зробити сироватку хімічно стабільною та життєздатною без необхідності її охолодження. Незабаром після цього кріодесикація була застосована до пеніциліну і була визнана важливою методикою збереження біологічних речовин. З цього часу ліофілізацію використовують як метод консервації або обробки для широкого спектру

					Д о н н У Е Т. 133.Г М Б -21 м.2022.П 3			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1. 1. Дослідження технології вакуумної-сублімаційної сушки	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розроб.	Кухта							
Перевір.	Хорольський							
Н. Контр.	Омельченко							
Затверд.	Цвіркун							

речовин. Це обробка харчових продуктів, фармацевтичних препаратів, наборів для діагностики хвороб; відновлення документів, пошкоджених водою; підготовка осаду річкового дна для вуглеводневого аналізу; виробництво флаконів з покриттям із сірки та інше

Фізичні основи процесу полягають у існуванні рівноваги фаз для води. Зазвичай лід, вода та водяна пара можуть існувати в рівновазі одночасно при тиску 0,61 кПа та температурі 0,0075°C. Крапка співіснування трьох фаз називається потрійною точкою, або точкою рівноваги. Якщо, починаючи з цієї точки, почати піднімати температуру, утримуючи тиск на рівні нижче точки рівноваги, можна спостерігати процес сублімації (рис. 1.1).

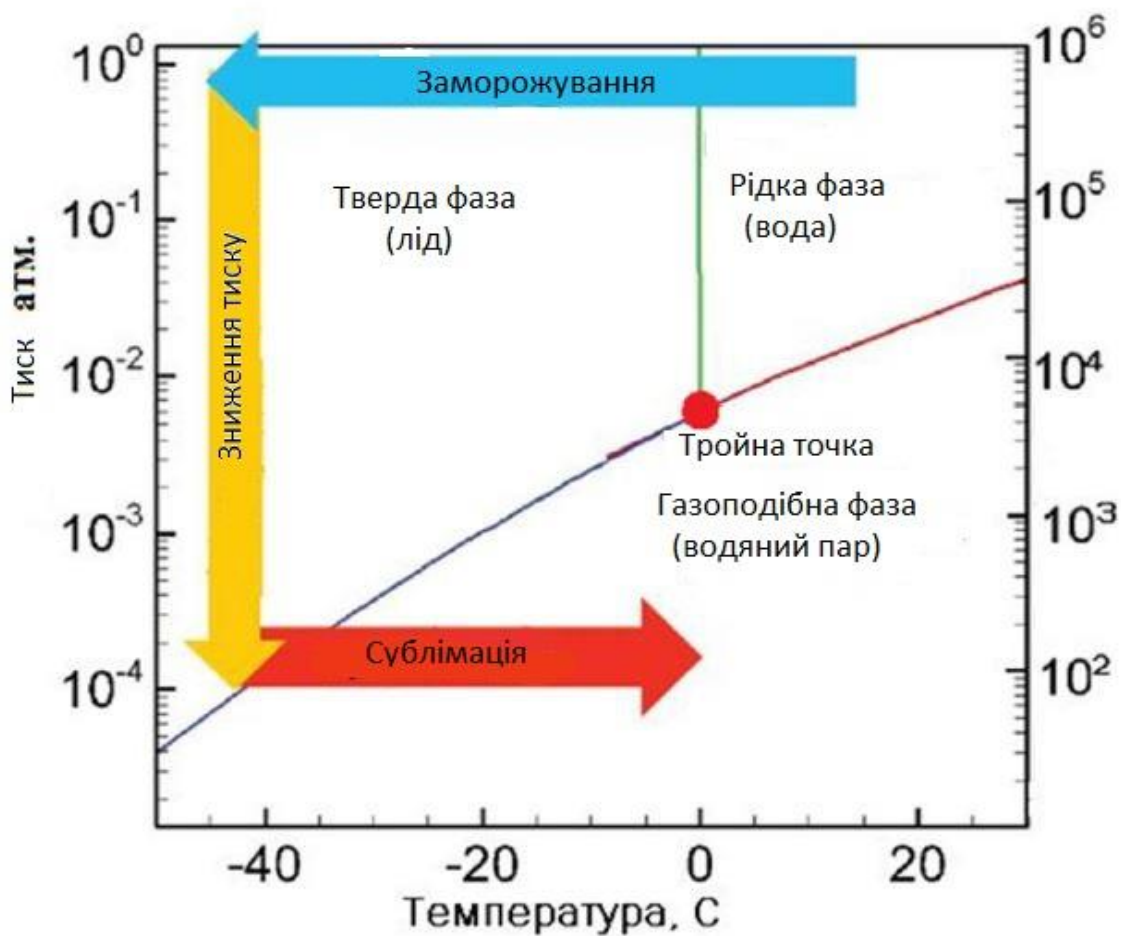


Рисунок 1.1 – Фізична модель процесу ліофілізації
Процес ліофілізації поділяють на чотири етапи див рис. 1.2

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



Рисунок. 1.2 – Етапи ліофілізації харчових продуктів

Попередня обробка – це будь-який спосіб обробки продукту до заморожування. Може включати концентрацію продукту, модифікацію складу (тобто додавання компонентів для підвищення стабільності, збереження зовнішнього вигляду та/або поліпшення обробки), зменшення вмісту розчинника з високим тиском парів або збільшення площі поверхні продукту. Шматочки їжі часто піддають поштучному швидкому заморожуванню (individual quick freezing, IQF), щоб перевести такий розчинник у вільний стан до початку ліофілізації.

Заморожування

Заморожування зазвичай здійснюється за допомогою ліофільної сушарки. На цьому етапі важливо охолодити матеріал нижче його потрійної точки (температура, при якій тверда, рідка та газоподібна фази матеріалу можуть існувати одночасно). Це гарантує, що наступних етапах відбудеться сублімація, а чи не плавлення (танення) кристалів. Великі кристали легше піддаються сублімації. Для отримання таких кристалів слід повільно заморожувати продукт, або циклічно підвищувати і знижувати температуру. Однак у разі обробки їжі (м'яса, ягід, водоростей) або інших об'єктів з клітинною структурою великі кристали льоду руйнують стінки клітин (цю проблему виявлено і вирішено Кларенсом Бердсай), що може призвести до погіршення текстури та зниження поживної цінності продукту. В цьому випадку заморожування виконується швидко, що дозволяє уникнути утворення кристалів льоду. $-50^{\circ}\text{C} \dots -80^{\circ}\text{C}$ – такою зазвичай є температура заморожування.

Фаза заморожування є найважливішою у всьому процесі ліофільного сушіння, і, якщо провести її неправильно, то продукт буде зіпсований.

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Первинне сушіння

У цю фазу тиск знижують до декількох мілібарів, і до висушеного матеріалу доставляється така кількість тепла, якого вистачить для сублімації льоду. У цій фазі сушіння сублімується близько 95% води. Цей етап може бути досить повільним (до кількох днів при сушінні у виробничих масштабах). Якщо додати занадто багато тепла, структура матеріалу може бути пошкоджена.

Тиск у камері контролюється за допомогою часткового вакууму. Вакуум прискорює процес сушіння. Крім того, холодна камера конденсатора та/або конденсаторні пластини забезпечують повторне затвердіння водяної пари. Конденсатор не відіграє жодної ролі у підтримці матеріалу у замороженому стані; швидше він запобігає попаданню водяної пари у вакуумний насос, що може погіршити його продуктивність. Температура конденсатора зазвичай нижча від -50°C .

Вторинна сушка

Ця фаза спрямована на видалення незаморожених молекул води (лід вже був сублімований в основній фазі). Ця частина процесу ліофілізації регулюється ізотермами адсорбції матеріалу. Температура вище, ніж у первинній фазі сушіння, і може навіть перевищувати 0°C , щоб припинити будь-які фізико-хімічні взаємодії, які утворилися між молекулами води та замороженим матеріалом. Зазвичай цьому етапі тиск знижують, щоб стимулювати десорбцію (зазвичай у діапазоні кількох мікробар). Тим не менш, є продукти, при сушінні яких тиск підвищують.

Після завершення процесу сублімації вакуум в вакуумі зазвичай руйнується інертним газом (наприклад, азотом), а потім проводиться герметизація висушеного продукту.

Після закінчення операції кінцевий вміст залишкової води продукті надзвичайно низький, від 1 до 4%.

1.2 Математичний опис механізму сублімації

Спробуємо прояснити механізм сублімаційного сушіння, покращивши порівняльно спрощене теоретичне рівняння.

Ймовірні умови стають необхідними;

1. Плоский матеріал має велику площу порівняно з його товщиною. Сублімація виконується лише у напрямку нормалі до поверхні.
2. У міру просування сублімації поверхня, що сублімує, вторгається паралельно поверхні в матеріал, після чого утворюється пористий сухий шар.
3. Температура верхньої поверхні матеріалу підтримується на постійному рівні, і тепло переноситься тільки в нормальному напрямку від поверхні на дно.
4. Оскільки висушений пористий шар має набагато меншу теплоємність, ніж заморожена частина, передана кількість тепла витрачається тільки

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ				

на сублимацію поверхні розділу. Тоді підвищення температури матеріалу вважається дуже малим.

5. Сублимуючий пар, що виріс на межі розділу, проходить через пористий шар та випромінюється з верхньої поверхні.
6. (Пористий висохлий шар складався з безлічі безсистемних дрібних пор зі сліпими провулків, відгалужень і кривих, для спрощення розрахунків будемо вважати, що він складається з безлічі капілярних труб.

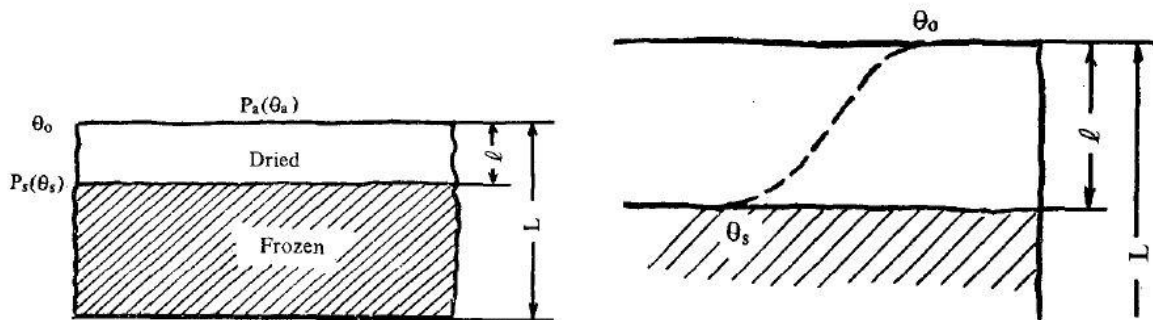


Рисунок 1.3. А) Розріз матеріалу під час сублимаційного сушіння; Б) Градієнт температури на висушеному шарі товщиною (L) шар

За цих припущень, як свідчить рис. 1.3, якщо припустити, що плоский матеріал з товщина (L) застосовувати сушку виморожуванням, через деякий час (t) висушений шар товщиною (l) утворюється у верхній його частині, тепло що передається можна вчислити за формулою 1.1.

$$Q = -KdQ/dl \quad (1.1)$$

де Q – кількість тепла, що передається в кал/см².хв;

dQ/dl – температурний градієнт у напрямку нормалі на поверхні;

K – теплопровідність висушеного шару в кал/см.хв.°C.

Коли теплопровідність висушеного матеріалу (K), і температурний градієнт ($\frac{dQ}{dl}$) постійні, то

$$Q = \frac{K \cdot (Q_0 - Q_s)}{L} \quad (1.2)$$

де Q_0 – температура поверхні в °C;

Q_s – температура поверхні сублимації в °C;

Тут слід обговорити теплопровідність висушеного матеріалу (K) та температурний градієнт (dQ/dl).

1). Теплопровідність висушеного матеріалу (K) залежить від ступеня вакууму в надвисокому вакуумі, але практичного використання звичайного процесу сублимаційного сушіння, можна з упевненістю сказати, що (K) значення майже постійне.

2). Величина теплопровідність висушеного матеріалу (K) залежить також від вологості висушеного шару. Так як вміст води поступово зменшується в міру сушіння, значення теплопровідності (K) також змінюється, але вимірювання вологості при сушінні настільки ускладнене, вважається що величина теплопровідності (K) вказує на її середнє значення протягом усього часу сушіння.

Тому надалі будемо вважати що аргументи теплопровідності (K) та температурний градієнт (dQ/dl) у цьому разі постійні.

Тепер сублімована пара на замороженому кордоні розділу, має вийти з поверхні, що проходить через пористий сухий шар. Рушійна сила, для випарювання пари прямо пропорційна градієнту тиску вздовж потоку пари у вакуумі (закон Дарсі). Тоді кількість сублімуючої пари, що випускається через висушений шар на одиницю площі представлений наступним чином в одиницю часу формула 1.3;

$$q = -\varphi \cdot dp/dl \quad (1.3)$$

де q – кількість сублімованої пари на одиницю площі, одиниця часу гДжсм².хв;

dp/dl – градієнт тиску в напрямку нормальної лінії на верхній поверхні;

φ – коефіцієнт паропроникності пористого висушеного шару.

Провідність означає кількість пари, що проходить через пористий висушений шар за одиницю часу, коли між обома кінцями а існує різниця тиску в 1 мм рт дрібні пори довжиною 1 мм. Приймавши (d) як діаметр маленької пори, кажуть (φ) пропорційна (d^4) у в'язкому потоці, і (d^3) у молекулярному потоці. Коефіцієнт паропроникності (φ) також залежить від температури і тиску пари.

Оскільки висушений шар включає в себе багато видів дрібних пор неправильної форми та розташовані випадковим чином, коефіцієнт паропроникності (φ) не є постійним значенням при будь-якій товщині а висушений шар. Але для спрощення приймемо коефіцієнт паропроникності (φ) як середнє значення тепла коефіцієнт передачі кожної пори.

Тому надалі будемо вважати що аргументи як коефіцієнт паропроникності (φ) і градієнт тиску (dp/dl) константа як і аргументи теплопровідності (K) та температурний градієнт (dQ/dl).

Тоді отримуємо

$$q = \frac{\varphi \cdot (p_s - p_a)}{L} \quad (1.4)$$

де p_s – тиск насиченої пари на межі сублімації;

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

p_a – атмосферний тиск насиченої пари поблизу конденсатора.

Рівняння (1) описує явище теплообміну, а (2) — описує явище масообмін. Досі багато дослідників розглядали або (1), або (2) окремо, але розглянемо об'єднав (1) і (2) як одне явище за допомогою теорії теплового балансу.

Припускаючи, що вся проведена кількість тепла витрачається лише на сублимації льоду отримує таке рівняння.

$$\frac{K \cdot (Q_0 - Q_s)}{L} = \frac{\lambda \cdot \varphi \cdot (p_s - p_a)}{L} \quad (1.5)$$

де λ – прихована теплота льоду кал/г.

Теорема Клаузіуса-Клапейрона говорить

$$\log p_s = \frac{\alpha + \beta}{273 + Q_s} \quad (1.6)$$

де α і β – постійні значення

Це рівняння говорить про те, що (p_s) має лінійний зв'язок з Q_s . Тоді можемо поставити.

$$p_s = \alpha \cdot Q_s \quad (1.7)$$

де α – коефіцієнт конвекції

Атмосферний тиск насиченої пари (p_a) дуже нагадує парціальний тиск пари навколо конденсатора. Тоді можемо поставити.

$$p_a = \beta \cdot Q_a \quad .8$$

де β – коефіцієнт конвекції

Склавши дані рівняння можемо отримати наступне.

$$Q_s = \frac{(K \cdot Q_0 + \alpha \cdot \varphi \cdot \beta \cdot Q_a)}{K + \lambda \cdot \varphi \cdot \alpha} \quad (1.9)$$

Рівняння (6) показує, що коли значення коефіцієнт паропроникності (φ) і (K) вважаються такими що постійна температура сублимації (Q_s) визначається як лінійна функція (Q_0) і (Q_a).

Розглянемо необхідну температуру сушіння. Температура сушіння означає температуру матеріалу в процесі сушіння, але оскільки вона залежить від часу і місця, температура лотка, що контактує з матеріалом розглядалася як температура сушіння. Як уже згадувалося, це відповідає Q_0 . Якщо температура поверхні Q_0 піднімається вгору, виходячи з рівняння (9), (Q_s) і ($Q_0 - Q_s$), вона повинна також мати певне підвищення. Це підвищення температури викликає послідовно кондуктивне збільшення кількості теплоти,

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення швидкості сушіння, скорочення часу сушіння. Чим вищою стає температура сушіння, тим коротшим стає час сушіння. Але занадто висока температура призводить до погіршення якості матеріалу, тому температура сушіння повинна бути нижче певної оптимальної температури, щоб у висушеному матеріалі не відбулася денатурація.

Денатурація білка не відбувалася при температурі лотка нижче 70°0 температури лотка, а значна денатурація була чітко помічена вище 80°0, і були помітні відмінності в швидкості дегідратації та реконструкції м'ясних тканин між м'ясом свіжої риби і м'ясом сушеної риби, навіть якщо воно було висушене при 54-56°0.

М'ясо риби сушиться при низькій температурі, і після реконструкції нагадує свіже м'ясо. Відповідно, оптимальна температура сушіння повинна триматися на найвищій межі 35°0.

Ступінь вакууму залежить від температури пастки, яку важко утримати практично нижче -50°0 відповідний тиск насиченої пари - 0,03 мм.рт.ст. Розрахунок впливу ступеня вакууму на швидкість сушіння за рівнянням (9), приріст швидкості сушіння не буде таким великим, як можна було б очікувати. не буде настільки великим, як можна було б очікувати, навіть якщо матеріал сушиться в більш низькому вакуумі. Наприклад, коли $\varphi = 2,0$, $Q_0 = 40^{\circ}0$ і (p_a) знижується з 0,06 мм.рт.ст. ($Q_\alpha = -44^{\circ}0$ С) до 0,0185 мм.рт.ст. ($Q_\alpha = -70^{\circ}0$ С), то швидкість сушіння збільшується всього на 2,08%. З іншого боку, при $\varphi = 2,0$, $p_a = 0,06$ мм рт.ст., (Q_α) підвищується від 40 °С до 60 °С, при таких умовах швидкість сушіння може прискоритися на 26,3%.

Тепер, повертаючись до рівняння (2), воно не буде мати місце при $l=0$.

У цьому випадку слід говорити про випаровування вільної поверхні у вакуумі. Кількість сублімованої пари на замороженій вільній поверхні у вакуумі визначається формулою Ленгмюра наступним чином.

$$q = \frac{\rho_s}{\sqrt{2\pi R}} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (1.10)$$

де ρ_s – тиск насиченої пари льоду при абсолютній температурі;

R – газова стала;

M – молекулярна маса води;

T – абсолютна температура льоду;

Розрахунок швидкості висихання при температурі поверхні -30°0 за цією формулою,

$$T = 273 + (-30) = 243$$

$$M = 18$$

$$\rho_s = 0,03$$

Тоді кількість сублімуючої пари (q) в абсолютному вакуумі становить 0,282 г/см².хв.

						Арк.
					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Але практична кількість сублимуючої пари набагато менша, ніж ця розрахована величина, тому що при випаровуванні перешкоджає зіткненню молекул пари з молекулами залишкового повітря у вакуумі.

Далі підставляє у формулу Ленгмюра коефіцієнт (γ)

$$q = \gamma \cdot \frac{\rho_s}{\sqrt{2\pi R}} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (1.11)$$

де $1 > \gamma > 0$

Мається на увазі постійна величина, яка залежить від стану замороженої поверхні і ступеня вакууму.

Цей термін розглядається як постійна поверхнева сублимація, так звана "стадія постійної швидкості сушіння". В кінці цієї стадії швидкість сушіння раптово падає, що пов'язано з виникненням опору тепло- і паропередачі зростанням висушеного шару.

Цю стадію називають "першою стадією зниження швидкості сушіння". Далі, після того, як весь лід був сублимований і в матеріалі не залишилося льоду, незамерзла вода все ще є, яка називається зв'язаною водою. Потрібна велика енергія і тривалий час, щоб видалити цю воду. Цей термін називають "другою стадією зниження швидкості сушіння", і на цій стадії швидкість сушіння значно падає. Ці три стадії спостерігаються як у звичайному процесі сушіння, так і в процесі сублимаційного сушіння. Є підтвердження наявності цих трьох стадій експериментами на сироватці крові щурів. [2]

Тепер, для того, щоб зобразити ці три стадії на графіку, зазвичай використовують наступний метод, тобто відкладають на осі абсцис залишковий вміст води, а на ординату - швидкість сушіння. Тут швидкість сушіння може бути отримана за допомогою наступних чотирьох операцій:

1. вимірювання зменшення ваги та часу висихання матеріалу;
2. нанесення цих вимірних значень на графічний папір;
3. диференціювання вищевказаної кривої графічно за часом;
4. ділення отриманих різницевих значень на ефективну площу сублимації матеріалу.

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Розділ 2. Розгляд технології(конструкції) вакуумно-сублімаційної сушарки для риби.

2.1 Розгляд загального виду конструкції вакуумно-сублімаційної сушарки

Відомо пристрій для сублімаційної сушіння харчових продуктів, що містить тунельну камеру з розміщеними в ній візками або продукту, нагрівальними елементами і систему відсмоктування газів, що не конденсуються.

Це досягається тим, що вакуумна сублімаційна установка включає тунельну камеру для розміщення в ній дек для матеріалу, а також системи нагріву, охолодження системи нагріву, охолодження і відсмоктування газів, що не конденсуються. На кресленні схематично представлено загальний вигляд установки.

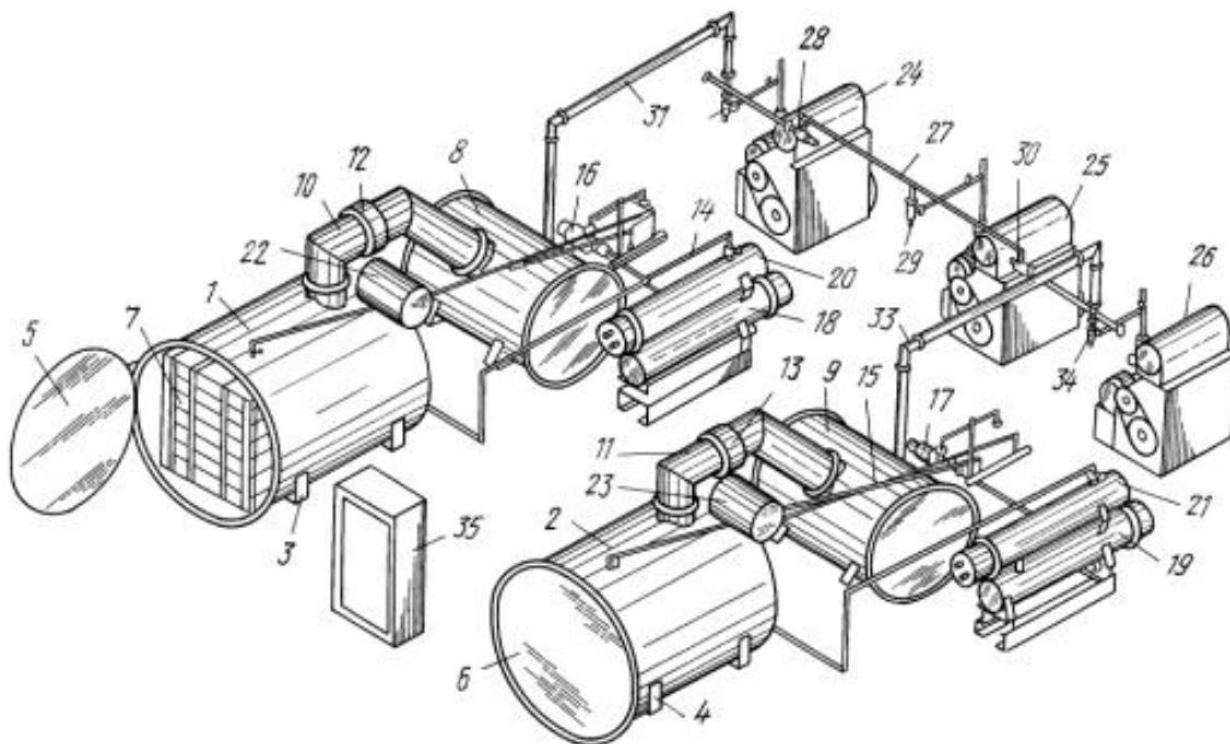


Рисунок 2.1 – Схема сублімаційної сушарки

Вакуумна сублімаційна установка являє собою дві однакові тунельні герметичні камери (субліматори) 1, 2, змонтовані на жорстких рамах 3, 4. Камери 1,2 виконані у вигляді циліндрів з кришками 5, 6, всередині яких розташовані тепло передавальні плити, що виконують роль полиць з листами

					Д о н н у е т . 133.Г М Б -21 м.2022.П 3			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Кухта				Розділ 2 Розгляд технології(конструкції) вакуумно-сублімаційної сушарки для риби.	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.	Хорольский							
Н. Контр.	Омельчинко							
Затверд.	Цвіркун							

7 для розміщення матеріалів. Камери 1, 2 з'єднані відповідно з десубліматорами 8, 9 за допомогою патрубків 10, 11 з вакуумними засувками 12, 13 і призначеними для конденсації водяної пари, що виділяються в процесі сушки матеріалів в камерах 1, 2. Десубліматори 8, 9 виконані у вигляді циліндрів, закритих з двох сторін кришками, всередині яких встановлені батареї, що охолоджуються (на кресленні не показані). Камери 1, 2 з десубліматорами 8, 9 за допомогою трубопроводів 14, 15 з'єднані з системами нагрівання та охолодження плит 7 субліматорів 1, 2, призначених для теплового режиму обробки (сушіння) матеріалів. Система нагріву та охолодження складається відповідно з насосів 16, 17, теплообмінників 18,19, охолоджувачів 20, 21, дозувально-розширювальних баків 22, 23.

Пристрій включає систему відсмоктування неконденсованих газів, призначену для створення та підтримки в камерах 1, 2 робочого тиску. Система являє собою три вакуумні насоси 24, 25, 26, послідовно з'єднаних трубопроводом 27 з вакуумними засувками 28, 29, 30.

Камера 1, з'єднана з десубліматором 8, через трубопровід 31 і вакуумну засувку 32 приєднана до вакуумного насоса 24, а камера 2, з'єднана з десубліматором 9, за допомогою трубопроводу 33 з вакуумною засувкою 34, приєднана до вакуумного насоса 26.

Пристрій має пульт 35 для управління процесом сушіння з ручним завданням регульованого параметра та автоматичною підтримкою заданого значення.

За допомогою пульта управління 35 включають холодильну машину (на кресленні не показано) і створюють робочу температуру на охолоджуючих батареях десубліматорів 8, 9, після чого включають вакуумні насоси 24, 25, 26 для нагрівання масла в них і виходу на робочий режим, вакуумні засувки 28, 29, 30, 32 та 34 закриті. Одночасно включають насоси 16, 17 для циркуляції теплоносія по трубопроводах 14, 15 через теплопередавальні плити 7 субліматорів 1, 2, при цьому температуру теплоносія підтримують мінімально можливою за допомогою охолоджувачів 20, 21.

Попередньо заморожений в листах матеріал укладають на полиці 7 субліматора 1 і закривають кришкою 5, після чого в камері 1 створюють робочий тиск, необхідний для процесу вакуумної сушіння сублімації, за допомогою включення вакуумних засувок 32, 28, 29, при цьому на камеру 1 працюють вакуумні насоси 24, 25 а вакуумний насос 26 в резерві. При виході на заданий режим вакууму закривають засувки 28, 29 і відключають насос 25. Робочий тиск в субліматорі 1 підтримується насосом 24.

При досягненні в субліматорі 1 робочого тиску, яке контролюється приладами на пульті 35, включають нагрівання теплоносія, а відповідно і теплопередаючих полиць 7, за допомогою нагрівальних елементів, розташованих у теплообміннику 18 і вручну встановлюють температуру допустимого нагрівання продукту, яка підтримується автоматично за допомогою приладів, встановлених на пульті 35. Після вищеписаних дій, попередньо заморожений на листах матеріал завантажують на полиці 7

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

субліматора 2 і закривають кришкою 6, включають насоси 25, 26 і, при виході їх на робочий режим, включають засувки 29, 30, 34. При досягненні в камері 2 необхідного для сублімації тиску, закривають засувки 30, 29 і відключають насос 25 та тиск підтримується насосом 26. Через теплонагрівальні елементів, встановлених у теплообміннику 19, встановлюють температуру полиць камери 2 до допустимої температури, необхідної для оброблюваного продукту, яка підтримується автоматично за допомогою приладів, встановлених на пульті 35.

Процес сушіння матеріалів у камерах 1, 2 контролюється за температурі та вакууму приладами, встановленими в пульті управління (на кресленні не показано), і підтримуються автоматично. У разі підвищення тиску в одній із камер 1, 2 включається насос 25 і через трубопровід 27, за допомогою вакуумних засувок 28 або 30, знижують тиск у камерах 1 або 2, при цьому температура охолоджувальних батарей десубліматорах 8, 9 повинна підтримуватися постійною та бути рівної заданої та нижче температури сублімації, характеризує висушуваний продукт.

Після закінчення процесу сушіння в одному із субліматорів, а у прикладі це буде субліматор 2, закривають вакуумну засувку 13 і тим самим відокремлюють десубліматор 9 від субліматора 2, закривають засувки 34, 30 і 29 і відключають насос 26, а якщо є необхідність, то і насос 25.

Виробляють девакуумізацію десубліматора 9 та 2 камери за допомогою напускних клапанів (на кресленні не показано) за рахунок встановлених пристроїв на пульті 35.

Відкривають кришку 6 і висушений продукт на деках вивантажують та відправляють на упаковку або для подальшого виробництва, а камеру 2 і десубліматор 9 готують для наступної сушіння: камеру 2 миють і теплопередаючі полиці 7 охолоджують до максимального значення за допомогою охолоджувача 21, через який проходить теплоносій, що циркулює по замкнутому контуру, а батареї, що охолоджують, десубліматора 9 розморожують гарячими парами холодоагенту холодильної камери або безпосередньо гарячою водою.

Після миття субліматора 2 охолодження його полиць 7 до робочої температури та відтайки охолоджувальних батарей десубліматора 9, даний модуль готовий до наступного циклу сушіння, при цьому вакуумна засувка 13 відкрита.

Після закінчення процесу сушіння матеріалу в камері 1, закривають вакуумні засувки 12, 28, 29 та 32, відключають насоси 24 і 25 і виробляють девакуумізацію субліматора 1 і десубліматора 8 за допомогою напускних клапанів (на кресленні не показано), за допомогою встановлених приладів на пульті 35. Відкривають кришку 5 і висушений продукт на деках знімають із полиць 7 і відправляють на упаковку або подальшу переробку, а камеру 1 та десубліматор 8 готують до наступного циклу сушіння.

Камеру 1 миють і за допомогою охолоджувача 20 охолоджують полиці 7 до робочої температури, а батареї, що охолоджують десубліматора 8

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

розморожують гарячими парами холодоагенту холодильної машини чи безпосередньо гарячою водою. Після закінчення цих процедур даний модуль готовий до наступному циклу сушіння, при цьому вакуумна засувка 12 відкрита.

2.2 Конструкція основної вакуумно-сублімаційної сушарки для риби

Розглянемо конструкцію вакуумно-сублімаційної сушарки на прикладі вакуум-сублімаційної установки В2-ФСБ

Установка В2-ФСБ застосовується для сублімації м'ясних продуктів (фарш, скибочки м'яса, риби), молочної продукції та іншої [6].

На рисунку 2.2 представлена установка В2 ФСБ, що складається з субліматора (1), десубліматора (2), установки гідроприводу (7), трубопроводу подачі холодоагенту (6), колектор трубопроводом (5), насосного бака (8), що направляють для висування систем контролю (9) [6].

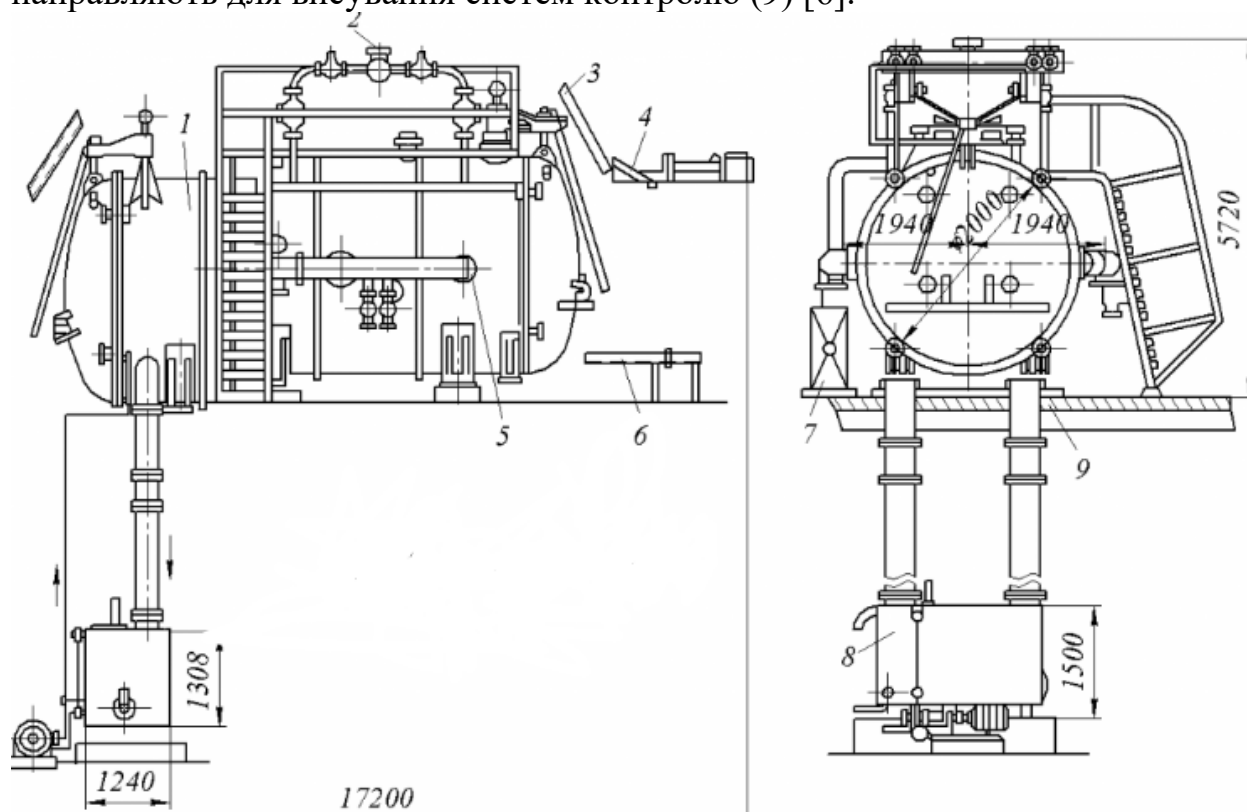


Рисунок 2.2 – Вакуумно-сублімаційна установка В2 – ФСБ

Субліматор (1) - горизонтально розташований циліндричний апарат усередині з десубліматором, два висувні нагрівальні пристрої, штанговий штовхач для пересування продуктивних візків, вакуумні та аміачні трубопроводи із запірною арматурою. Вбудований десубліматор [6] (конденсатор) виконаний із труб у вигляді десяти однорядних секцій з індивідуальною подачею холодоагенту та розділений симетрично на дві рівні частини по п'ять секцій у кожній. Між секціями на підвісних шляхах розміщуються нагрівальні пристрої та продуктові візки. Усередині корпусу передбачені два жолоби для видалення льоду з форсунками для його

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

подрібнення та гідротранспортування, штанговий штовхач для завантаження продуктивних візків у сублиматор та вивантаження їх із сублиматора, підвісні шляхи. Корпус по торцях закривається двома шарнірно підвішеними кришками, у нижній частині має три опори.

Висувні нагрівальні пристрої складаються з двох візків, виконаних у вигляді односторонніх консольних етажерок, на яких закріплені електричні плоскі нагрівальні панелі з нагрівального кабелю. Кожен пристрій має 6 знімних панелей у горизонтальному ряду та 21 ряд панелей по вертикалі.

У насосну установку (7) входить чотири вакуум-насоси, два типи ВН-500М представлений на рис 2.2, для початкового вакуумування при тиску 100-50 Па і два насоси ВН-7ГМ представлений на рис 2.3, що застосовуються для подальшого робочого процесу. Вакуумметрами контролюють вакуум [6].

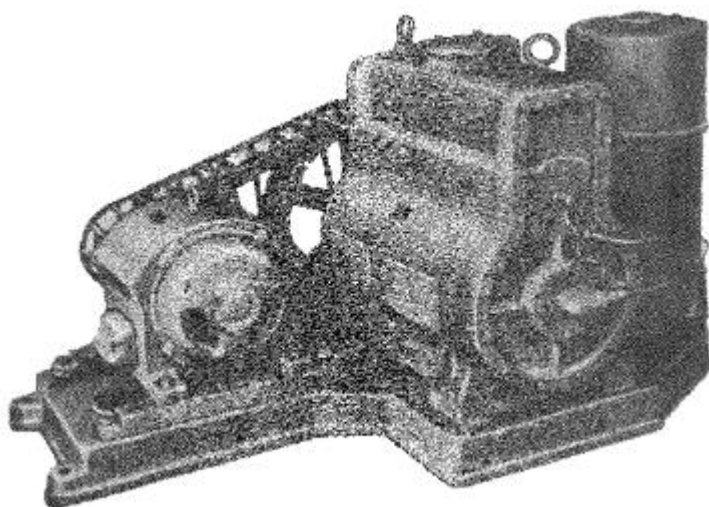


Рис 2.3 Вакуумний насос плунжерного типу, великої потужності ВН-500М.



Рис 2.4 Вакуумний насос плунжерного типу, середньої потужності ВН-7ГМ.

Холодильна установка включає два двоступінчасті аміачні холодильні агрегати АДСРБ-200 загальною холодопродуктивністю 839 000 кДж/год.

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальна технічна характеристика АДСРБ-200 приведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Технічна характеристика двоступінчастої аміачної установки

Показники	Значення
Температура кипіння, °С	-45.....-25
Ступень низького тиску	АК-РАБ100/2
Ступень високого тиску	АУ200/4Д
Q ₀ (при температурі кипіння -30 ⁰ С і температурі конденсації 35 ⁰ С), кВт	215
N _e (при температурі кипіння -30 ⁰ С і температурі конденсації 35 ⁰ С), кВт	96
Співвідношення описуємих об'ємів	0,502

Трифазні блоки тиристора регулюють потужність на нагрівачах. Холодильна установка складається з двох холодильних агрегатів, де як холодоагент використовується аміак [6].

Загальна технічна характеристика вакуумно-сублімаційної сушарки В2 ФСБ представлена в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Технічна характеристика сублімаційної сушарки В2-ФСБ

Технічна характеристика	Одиниці виміру	Значення
Потужність випаровування вологи	Кг/д	2300
Площа деко	м ²	106,6
Продовження таблиці 2.2		
Завантаження деко продуктом	кг/м ²	10,5
Встановлена потужність	кВт	628
Витрати води	м ³ за цикл	21
Витрата холодоагенту при -35 ⁰ С	кДж/г	471625
Габаритні розміри субліматора	мм	8490x5140x4806
Габаритні розміри сушарки	мм	17200x5720x4806
Маса	кг	31970

2.3 Тепловий розрахунок

Мета теплового розрахунку сублімаційної сушарки, є визначення теплового балансу сушарки, визначення площі поверхні конденсатора і

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхню сублімації.

Початкові дані:

Висушуваний матеріал – філе прісноводної риби

Вміст сухої речовини у вихідному шматочку, % $W_{\text{кон}} = 85$

Кінцеве вологовміст висушеного шматочку, % $W_{\text{кр}} = 10$

Початкова густина філе ляща, кг/м^3 $\rho_{\text{п}} = 1032$

Кінцева густина матеріалу, кг/м^3 $\rho_{\text{к}} = 1260$

Продуктивність сушарки за вихідним продуктом, кг/год. $G = 40,0$

Для розрахунку приймаємо:

$h = 0.01$ м - товщина філе ляща [10]

$t_{\text{кон}} = 30$ 0С - гранична температура матеріалу в кінці сушіння [10]

$t_{\text{с}} = -14$ 0С - температура сублімації [9]

$t_{\text{к}} = -40$ 0С - температура конденсації [9]

$\beta = 0.46$ $\text{кг/мм.рт.ст.}\cdot\text{м}^2$ - коефіцієнт масовіддачі [11]

Визначимо швидкість сублімації згідно з формулою 11 [11]

при температурі сублімації = -14 0С

при температурі конденсації = -40 0С

$$\begin{aligned} S &= \beta(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{к}}) & (2.1) \\ S &= 0,46(1,385 - 0,095) = 0,65 \text{ кг/м}^2\text{ч} = \\ &= 1,64 \times 10^{-4} \text{ кг/м}^2\text{с} \end{aligned}$$

де, β – коефіцієнт масовіддачі при сублімації, кг/мм.рт.ст. ;

$\rho_{\text{п}}$ – початкова щільність матеріалу, кг/м^3 ;

$\rho_{\text{к}}$ – кінцева щільність матеріалу, кг/м^3 .

Визначення кількості матеріалу під час сублімації:

Кількість сухої речовини, що міститься в 100 кг, з урахуванням що вихідний вміст сухої речовини = 80%, дорівнює:

$$M_1 = m \cdot \omega_1 = 12 \text{ кг} \quad (2.2)$$

де m – маса кінцевого продукту, кг $m = 40$ кг;

ω_1 – кількість сухої речовини у вихідному напої $\omega_1 = 0.3$

Кількість вологого продукту після сублімації, з урахуванням що кінцева вологість продукту 10%:

$$M_2 = \left(\frac{M_1}{100-10} \right) \cdot 100 = 13,3 \text{ кг} \quad (2.3)$$

Кількість води, яку необхідно виморозити та випарувати:

$$M_3 = m - M_2 = 26,6 \text{ кг} \quad (2.4)$$

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, тривалість сублімації дорівнюватиме:

$$\tau_c = \frac{M_3}{S} = 40 \text{ год} \quad (2.5)$$

Тепловий розрахунок сублімаційної сушарки

Прихована теплота сублімації. Приховану теплоту сублімації визначаємо згідно з формулою 18

Коефіцієнт теплопровідності продукту [12], Вт/м·К $\lambda_{\text{п}} = 0.47$;

Товщина шару висушеного продукту згідно з рекомендаціями, м $l_{\text{в}} = 0.005$;

Температура льоду в зоні сублімації, згідно з рекомендаціями [9], °С $t_{\text{л.с}} = -10$;

Температура поверхні матеріалу [11]:

$$t_{\text{п.м.}} = t_{\text{л.с.}} + \frac{S \rho_{\text{п}} l_{\text{в}}}{2 \lambda_{\text{п}}} = 6,335 \quad (2.6)$$

Тоді прихована теплота сублімації:

$$r_c = \frac{\lambda_{\text{п}}}{l_{\text{в}}} (t_{\text{п.м.}} - t_{\text{л.с.}}) = 344,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (2.7)$$

Визначимо кількість тепла, що витрачається на сублімацію за формулою

$$Q_c = S \cdot r_c = 223,925 \frac{\text{Вт}}{\text{год} \cdot \text{м}^2} \quad (2.8)$$

Розрахунок нагрівачів. Відповідно до рекомендацій [9] приймемо коефіцієнт нерівномірності сублімації = 1.3

$$Q_{\text{н}} = 1.3 \cdot Q_c = 291,10 \frac{\text{Вт}}{\text{год} \cdot \text{м}^2} \quad (2.9)$$

Необхідна поверхня завантаження для сублімації [9]

$$F_3 = \frac{G}{m} = 0.4 \text{ м}^2 \quad (2.10)$$

Повна потужність нагрівачів [1]:

$$Q_{3F} = F_3 \cdot Q_{\text{н}} = 116,44 \text{ Вт} \quad (2.11)$$

					ДОННУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Підвищення енергоефективності сушки риби в вакуумно-сублімаційній сушарки підвода тепла завдяки мікрохвильового модуля

3.1 Дослідження температурних параметрів мікрохвильового впливу на рибний продукт

Основна проблема оптимізації процесів пов'язана з тим, що накладений температурний градієнт має напрямок, протилежний градієнту концентрації пари. Більш того, висохлий шар виконує роль теплоізоляції для теплових потоків, що передаються у бік промерзлого шару. Запропонований новий методом сублімаційної сушки, який долає ці недоліки, є мікрохвильова ліофілізація. Мікрохвилі дуже добре проникають у лід та об'ємно постачають енергію для сублімації. і вибірково, оминаючи проблему перенесення тепла через висохлий шар матеріалу. Мікрохвилі можуть нагрівати без допомоги температурних градієнтів, що позитивно впливає на якість продукту. Завдяки останнім розробкам мікрохвильового обладнання вартість обладнання на даний момент не надто висока, що робить цей метод перспективною альтернативою звичайним технологіям.

Хоча використання мікрохвильового модуля може значно покращити швидкість сушіння, на практиці все ще є багато проблем, які потрібно вирішити. Застосування мікрохвильового нагрівання обмежене через складність контролю якості кінцевого продукту. Тому слід встановити обмеження, щоб уникнути специфічних проблем мікрохвильового модуля, таких як коронний розряд і нерівномірне нагрівання, які спричиняють танення та перегрів льоду. Щоб проаналізувати та подолати ці проблеми, слід провести експериментальні та теоретичні дослідження, щоб отримати оптимальну політику керування мікрохвильового модуля щодо конкретного матеріалу, що висушується.

Застосування мікрохвильової енергії в процесі мікрохвильового модуля може викликати появу плазмового розряду у вакуумній камері. Це явище відбувається, коли інтенсивність електричного поля E перевищує порогове значення, що може серйозно пошкодити кінцевий продукт. Тому верхня межа напруженості електричного поля повинна бути встановлена та врахована в математичному моделюванні.

Коли мікрохвилі, як правило, на стандартній частоті $f = 2.445$ ГГц, застосовуються в мікрохвильового модуля, напруженість електричного поля E є контрольованим параметром процесу, який відображає інтенсивність нагрівання. Розподіл напруженості електричного поля в мікрохвильовому

					Д о н Н У Е Т. 133.Г М Б -21 м.2022.П 3			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Кухта				Розділ 3. Підвищення енергоефективності сушки риби в вакуумно-сублімаційній сушарки підвода тепла завдяки мікрохвильового модуля	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.	Хорольський							
Н. Контр.	Омельчинко							
Затверд.	Цвіркун							

аплікаторі та всередині висушеного зразка можна визначити шляхом вирішення рівнянь Максвелла. Такий підхід є математично складним для застосування і особливо складним для багатомодових аплікаторів. Інша складність пов'язана з тим, що сублімований матеріал складається з двох шарів: замороженого і висушеного, які є різними діелектриками.

Експоненціальне спадання напруженості електричного поля в діелектрику, описане законом Ламберта, зазвичай опускається в сублімаційній сушарці і спрощується значенням напруженості електричного поля, усередненим для всієї проби матеріалу [10]. Типові біоматеріали та харчові продукти, що містять воду як у замороженому, так і в висушеному вигляді, характеризуються надзвичайно високою глибиною проникнення в кілька або навіть десятки метрів. З цієї причини розподіл напруженості електричного поля в продукті, сформованому у вигляді тонкого шару або розміщеному у флаконах, є незначним.

Для конкретної мікрохвильової системи постійної частоти f ефективність поглинання та розсіювання мікрохвильової енергії в тепло в заморожених і висушених шарах матеріалу залежить від його діелектричних властивостей: відносної діелектричної проникності ϵ' і відносного коефіцієнта втрат ϵ'' . Обидва параметри змінюються залежно від температури, тому цю залежність слід брати до уваги при моделюванні для обох областей вибірки.

Застосування мікрохвильової енергії в сублімаційній сушці вивчається з середини 20 століття. Математичні моделі процесу сублімаційної сушки зазвичай формулюють ся з припущенням псевдостационарного стану та виводяться на основі аналізу тепло- та масообміну. Ма і Пелтре в 1975 році описали одну з перших комплексних математичних моделей сублімаційної сушки харчових продуктів. Отримано хороший збіг з експериментальними результатами сушіння яловичини. Деякі дослідники брали до уваги явища сублімації-конденсації в процесі сублімаційної сушки [10]. Багато математичних аналізів, представлених у статтях, що стосуються сублімаційної сушки при звичайному нагріванні, можуть бути адаптовані в моделюванні сублімаційної сушки з мікрохвильовим підводом після включення об'ємного джерела тепла в набір рівнянь моделі [11].

У цьому розділі представлені основні ідеї моделювання застосування мікрохвильової енергії в сублімаційній сушці і прояснено ключові механізми тепло- та масопереносу, що керують процесом. Сформульовано комплексну математичну модель первинної та вторинної стадій сублімаційної сушки при мікрохвильовому нагріванні, яка дозволяє отримати оптимальний алгоритм керування процесом залежно від теплофізичних властивостей і товщини матеріалу, що висушується, загального тиску та вхідної потужності НВЧ. Одновимірна двообласна модель первинного сублімаційної сушки при мікрохвильовому нагріванні була розроблена, а потім розв'язана за допомогою різних чисельних підходів, таких як перетворення Ландау (LT) і методи змінного кроку в часі (VTS). Була врахована змінна протягом процесу

						Арк.
					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температура фронту сублімації, спричинена зміною з часом пародифузійного опору масопередачі.

Математична модель вторинної сублімаційної сушці при мікрохвильовому нагріванні також була розроблена та розв'язана за допомогою чисельного методу ліній (NMOL). Падіння тиску в матеріалі було враховано та розраховано за допомогою рівняння Ергуна. В результаті вирішення обох моделей було отримано вміст вологи та розподіл температури в матеріалі для сушіння.

Аналіз, проведений на основі математичного моделювання, дозволяє розрахувати оптимальні діапазони значущих параметрів матеріалу та процесу, які забезпечують отримання гарної якості продукції та оптимального часу сушіння при мікрохвильовому нагріванні.

3.2. Математичне моделювання первинної сублімації

Формулювання моделі та припущення

Розглянемо висушений матеріал, який має геометрію плити нескінченної довжини. Дно зразка ізольовано для тепло- та масообміну, а верхня поверхня піддається впливу вакууму при температурі сушильної камери, як показано на рисунку 3.1

. Під час первинної стадії процесу, коли сублімована пара дифундує від фронту льоду до відкритої поверхні, рухома межа відступає до повного видалення замерзлої вільної води. Фронт льоду (рухома границя) вважається площиною нульової товщини, а його початкове положення визначено довільно. У замороженій області I енергія передається шляхом провідності, тоді як провідність і конвекція розглядаються у висушеній області II.

Для домінуючої поляризації електричного поля, нормального до поверхні зразка, можна припустити, що напруженість електричного поля постійна у всьому висушеному матеріалі та дорівнює значенню на поверхні. Таке спрощення виправдане, коли глибина проникнення мікрохвиль значно перевищує розмір зразка.

Фізична система описується наступними диференціальними рівняннями

Заморожений область

Теплопередача за рівнянням (3.1):

$$\frac{dT_I}{dt} = a_{eI} \frac{d^2T_I}{dx^2} + \frac{Q_{vI}}{\rho_{bul}c_{pI}} \quad (3.1)$$

Висушена область

						Арк.
					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Теплопередача за рівнянням (3.2):

$$\frac{dT_{II}}{dt} = a_{eII} \frac{d^2 T_{II}}{dx^2} - \frac{c_{pw}}{\rho_{bul} c_{pII}} \cdot \frac{d(N_w T_{II})}{dx} + \frac{Q_{vII}}{\rho_{bul} c_{pII}} \quad (3.2)$$

Сталі потужності внутрішніх джерел тепла в рівняннях (3.1) і (3.2) визначаються таким чином:

$$Q_{vi} = K_{dissi}(T_i) E^2 \quad \text{для } i = I, II$$

де коефіцієнт дисипації:

$$K_{dissi}(T_i) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_i''(T_i) \quad \text{для } i = I, II$$

Тут коефіцієнт дисипації у наведених вище рівняннях виражається як лінійна функція температури матеріалу:

$$K_{dissi}(T) = \mu_{1i} T + \mu_{2i} \quad \text{для } i = I, II$$

де параметри μ_1 та μ_2 визначаються шляхом лінійної регресії експериментальних даних [13].

Масопередача за рівнянням (3.3):

$$D_{eII} \frac{d^2 c}{dx^2} = \frac{dc}{dt} \quad (3.3)$$

Ефективна дифузія за рівнянням (3.4):

$$\frac{1}{D_{eII}} = \frac{1}{D_K} + \frac{1}{D_M} \quad (3.4)$$

де D_K – комбінацією дифузії Кнудсена;

D_M – молекулярна дифузія.

Фронт сублімації.

Тепловий потік і потік маси в псевдостационарних умовах пов'язані між собою за формулою (3.5):

$$q_s = N_w \Delta h_s \quad (3.5)$$

Тоді енергетичний баланс дорівнює:

$$-k_{eI} \frac{dT_I}{dx} + k_{eII} \frac{dT_{II}}{dx} = N_w \Delta h_s \quad (3.6)$$

Переміщення рухомої межі пов'язане зі швидкістю сублімації:

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_w = -(W_{ini} - W_{eq})p_{бул} \frac{dx(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Початкові умови

Початкові позиції рухомих меж можна визначити наступним чином:

$$X(t) = L - \delta, \quad \text{для } t = 0$$

де довільна початкова товщина висушеного шару вибирається як $\delta = 3\%$ товщини зразка. Це значення δ використовується для початку чисельних розрахунків сформульованої моделі. У мерзлому шарі накладається постійна початкова температура:

$$T_1(x, 0) = T_{ini}, \quad \text{для } 0 \leq x \leq X \quad \text{і } t = 0$$

У висушеному шарі приймаються початкові лінійні профілі температури та концентрації:

$$\frac{T_L(0) - T_{II}(x, 0)}{T_L(0) - T_{ini}(0)} = \frac{L - x}{\delta}, \quad \text{для } X \leq x \leq L \quad \text{і } t = 0$$

де

$$T_L(0) = \frac{a_{II\infty}(L-x)T_{vc} + k_{eII}T_s}{a_{II\infty}(L-x) + k_{eII}}, \quad \text{для } x = L \quad \text{і } t = 0$$

$$C = C_{vc} - \left(\frac{dC}{dx}\right)_{x=X} (L - x), \quad \text{для } X \leq x \leq L \quad \text{і } t = 0$$

Граничні умови

Тепловіддача через нижню межу матеріалу, ізольованого стінкою тефлонової ємності, відсутня:

$$\left(-k_{eI} \frac{dT_I}{dx}\right)_{x=0} = 0, \quad \text{для } t \geq 0$$

Відбувається передача тепла між відкритою поверхнею матеріалу та навколишнім середовищем:

$$k_{eII} \left(\frac{dT_{II}}{dx}\right)_{x=L} = a_{II\infty}(T_{vc} - T_L) \quad \text{для } t \geq 0$$

На фронті льоду передбачається термодинамічна рівновага між водяною парою та льодом. Таким чином, масова концентрація пари на рухомому фронті

						Арк.
					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пов'язана Клаузіусом-Клапейроном відношення:

$$C_s(t) = f(T_s) = \exp\left(\frac{a}{T_s} + b\right) M_w / (RT_s), \text{ для } x = X(t) \text{ і } t \geq 0$$

де: $a = -6320,152$ і $b = 29,558$

Конденсатор підтримує низький тиск у вакуумній камері, тому опір масопередачі на відкритій поверхні незначний:

$$C_L(t) = C_{vc}, \text{ для } x = L \text{ і } t \geq 0$$

Розв'язок одновимірної задачі рухомої межі в плоскому середовищі, описаному рівняннями вище приведених не може бути легко отриманий, якщо не використовувати деякі чисельні методи. У літературі повідомлялося про багато підходів, що стосуються проблеми загальної рухомої межі з такою фазовою зміною, як плавлення, твердіння або сублимація. Деякі дослідження використовують фіксовану сітку, формулювання фіксованого кроку в часі, але це не в змозі дати надійну оцінку температури матеріалу поблизу рухомої межі [13].

Іншим популярним підходом є метод перетворення Ландау, який математично знерухомлює рухому межу так, що кількість просторових вузлів у замороженій та висушеній області є постійною (рис. 3.1). Така трансформована математична модель може бути легко розв'язана за допомогою комерційного програмного забезпечення.

У цій роботі цей метод порівнюється з підходом зі змінним кроком у часі, представленим як альтернативний та ефективний чисельний метод розв'язання задачі з рухомою межею. У методі змінним кроком у часі використовується фіксована сітка, а часовий крок налаштований таким чином, щоб інтерфейс зміщувався рівно на один простір сітки (рис. 3.1). Цей підхід можна застосовувати разом із методом перетворення Ландау.

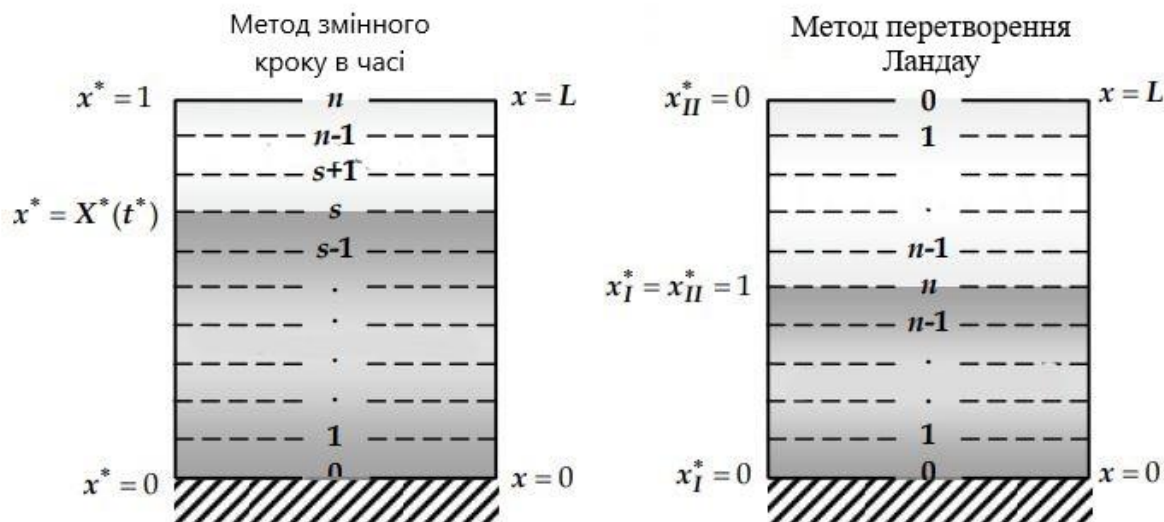


Рисунок 3.1 – Сітка дискретизації просторової змінної

Сформульовану математичну модель мікрохвильової сублімаційної сушки розв'язували чисельно за допомогою двох підходів: зі змінним кроком у часу та методу перетворення Ландау.

Рівняння складають набір рівнянь математичної моделі, які дискретизуються неявною скінченно-різницевою схемою Кренка-Ніколсона та розв'язуються разом з початковими умовами та граничні умови.

Метод зміни кроком у часі є підходом просторової фіксованої сітки. Кількість просторових вузлів в обчислювальній сітці, отриманій в результаті дискретизації, є постійною. Це означає, що на кожному кроці обчислень фронт сублімаційного льоду повинен переміщатися рівно на один простір сітки від попереднього місця. Замість рівнянь 3.7 має виконуватися наступний одночасний баланс тепла і маси на рухомій межі:

$$-k_{el} \frac{T_{s,j} - T_{I_{s-1},j}}{\Delta x} - k_{el} \frac{T_{s,j} - T_{I_{s+1},j}}{\Delta x} - (W_{ini} - W_{eq}) \rho_{bulI} \Delta h_s \frac{\Delta x}{\Delta t} - \rho_{bulI} \Delta h_s \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_{s,j} - T_{I_{s-1},j}) = 0$$

де у наведеній вище кінцево-різницевій схемі: нижній індекс s представляє розташування просторової сітки інтерфейсу сублімації льоду (рухома межа), а нижній індекс j вказує часовий крок.

Окремі члени у вищенаведеному рівнянні відповідають щільності теплового потоку, що передається від заморожених і висушених областей матеріалу, теплового потоку, що використовується сублімацією, і тепла, необхідного для підвищення температури вузла розділу від попереднього кроку часу до поточного.

Для зручності розв'язування введено такі безрозмірні змінні:

$$x^* = \frac{x}{L} \quad X^* = \frac{X}{L} \quad t^* = \frac{a_{el} t}{L^2} \quad C^* = \frac{C - C_{vc}}{C_{s,3} - C_{vc}}$$

$$T_I^* = \frac{T_I - T_0}{T_{vc} - T_0} \quad T_{II}^* = \frac{T_{II} - T_0}{T_{vc} - T_0} \quad W^* = \frac{W - W_{eq}}{W_{ini} - W_{eq}}$$

де W – означає середню вологість шару матеріалу.

Головні рівняння 3.1-3.3 тепер можна переписати так:

$$\frac{d^2 T_I^*}{dx^{*2}} - \frac{dT_I^*}{dt^*} = \frac{Q_{vI} L^2}{k_{el}(T_{vc} - T_0)} \quad (3.8)$$

$$\frac{d^2 T_{II}^*}{dx^{*2}} - \frac{c_{pw} \rho_{bulI} a_{el} (W_{ini} - W_{eq})}{k_{el}} \frac{dX^*}{dt^*} \frac{dT_{II}^*}{dt^*} = - \frac{Q_{vI} L^2}{k_{el}(T_{vc} - T_0)} \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2 C^*}{dx^{*2}} - \frac{a_{el}}{D_{eII}} \frac{dC^*}{dt^*} = 0 \quad (3.10)$$

						Арк.
					ДОННУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Баланс тепла і маси на фронті сублімації (3.5) можна переписати так:

$$-k_{el} \frac{T_{s,j}^* - T_{I_{s-1},j}^*}{\Delta x^*} - k_{el} \frac{T_{s,j}^* - T_{I_{s+1},j}^*}{\Delta x^*} - \frac{W_{ini} - W_{eq}}{T_{vc} - T_0} \rho_{bull} \Delta h_s a_{el} \frac{\Delta x^*}{\Delta t^*} - k_{el} \frac{\Delta x^*}{\Delta t^*} (T_{s,j}^* - T_{I_{s1},j-1}^*) = 0$$

На кожному кроці розрахунку значення фактичного кроку в часі, що відповідає одному переміщенню в просторі просторової сітки, визначається ітераційно методом ділення навпіл як корінь рівняння. (3.10). Початкові умови набувають вигляду:

$$x^* = \frac{\delta}{L} \quad \text{для } t^* = 0$$

$$T_I^* = 0 \quad \text{для } 0 \leq x^* \leq X^* \text{ і } t^* = 0$$

$$T_{II}^* = \left(1 - \frac{1 - x^*}{1 - X^*}\right) T_{II_L}^* \quad \text{для } X^* \leq x^* \leq 1 \text{ і } t^* = 0$$

$$C^* = \frac{k_{el}(T_{vc} - T_{ini})T_{II_L}^*}{D_{el}(C_{s,3} - C_{vc})\Delta h_s} x_{II}^* \quad \text{для } X^* \leq x^* \leq 1 \text{ і } t^* = 0$$

де

$$T_{II_L}^* = \frac{a_{II\infty}(1 - X^*)}{a_{II\infty}L(1 - X^*) + k_{el}} \quad \text{для } x^* = 1 \text{ і } t^* = 0$$

Граничні умови можна переписати в такий вигляд:

$$\frac{dT_I^*}{dx^*} = 0 \quad \text{для } x^* = 0 \text{ і } t^* > 0$$

$$T_{II}^* - \frac{k_{el}}{a_{II\infty}L} \frac{dT_{II}^*}{dx^*} - 1 = 0 \quad \text{для } x^* = 1 \text{ і } t^* > 0$$

$$C^* = f(T_{II}^*) \quad \text{для } x^* = X^* \text{ і } t^* > 0$$

$$C^* = 0 \quad \text{для } x^* = 0 \text{ і } t^* > 0$$

Скінченно-різницеві схеми рівнянь, разом із початковими і граничними умовами складають набір алгебраїчних лінійних рівнянь і можуть бути легко розв'язані за допомогою тридіагонального алгоритму. Фактичне положення рухомої границі X_j^* від часу було обчислено як: $X_j^* = X_0^* - \Delta x^* j$, де j означає фактичну кількість часових кроків. Аналогічно, фактичний середній вміст вологи W_j^* в залежності від часу було обчислено як: $W_j^* = W_0^* - \Delta W^* j$ де

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$\Delta W^* = \Delta x^*$$

Перетворення Ландау перетворює проблему рухомої межі на проблему фіксованої межі, вводячи такі визначення безрозмірних координат позиції в замороженій і висушеній області:

$$x_I^* = \frac{x}{X(t)}$$

$$x_{II}^* = \frac{L - x}{L - X(t)}$$

Вони використовуються в поєднанні з безрозмірними змінними, визначеними так само, як і в моделі зі змінним кроком. Рівняння математичної моделі 3.2-3.6 тепер мають більш складну безрозмірну форму. Теплообмін в мерзлому шарі становить:

$$\frac{d^2 T_I^*}{dx_I^{*2}} - x_I^* X^* \frac{dX^*}{dt^*} \frac{dT_I^*}{dx_I^*} = - \frac{Q_{vl} L^2}{k_{el} (T_{vc} - T_0)} X^{*2}$$

Тепломасообмін у висушеному шарі наступний:

$$\frac{d^2 T_{II}^*}{dx_{II}^{*2}} - \left(\frac{c_{pw} \rho_{bul} a_{el} (W_{ini} - W_{eq})}{k_{el}} + \frac{a_{el}}{a_{eII}} \right) (1 - X^*) \frac{dX^*}{dt^*} \frac{dT_{II}^*}{dx_{II}^*}$$

$$- \frac{a_{el}}{a_{eII}} (1 - X^*)^2 \frac{dT_{II}^*}{dx_{II}^*} = - \frac{Q_{vl} L^2}{k_{el} (T_{vc} - T_{ini})} (1 - X^*)^2$$

$$\frac{d^2 C^*}{dx_{II}^{*2}} - \frac{a_{el}}{D_{eII}} x_{II}^* (1 - X^*) \frac{dX^*}{dt^*} \frac{dC^*}{dx_{II}^*} - \frac{a_{el}}{D_{eII}} (1 - X^*)^2 \frac{dC^*}{dt^*} = 0$$

Баланс тепла і маси на фронті сублімації:

$$- \frac{T_{vc} - T_{ini}}{L} \left[\frac{k_{el}}{(1 - X^*)} \left(\frac{dT_{II}^*}{dx_{II}^*} \right)_{x_{II}^*=1} + \frac{k_{el}}{X^*} \left(\frac{dT_I^*}{dx_I^*} \right)_{x_I^*=1} \right] = N_w \Delta h_s$$

$$N_w = \frac{D_{eII} (C_{s,3} - C_{vc})}{L(1 - X^*)} \left(\frac{dC^*}{dt^*} \right)_{x_{II}^*=1} = - \frac{\rho_{bul} a_{el} (W_{ini} - W_{eq})}{L} \frac{dX^*}{dt^*} \text{ для } t^* \geq 0$$

Початкові умови набувають вигляду:

$$X^* = \frac{\delta}{L} \text{ для } x_I^* = x_{II}^* = 1 \text{ і } t^* = 0$$

$$T_I^* = 0 \text{ для } 0 \leq x_I^* \leq 1 \text{ і } t^* = 0$$

$$T_{II}^* = (1 - x_{II}^*) T_L^* \text{ для } 0^* \leq x_{II}^* \leq 1 \text{ і } t^* = 0$$

$$C^* = \frac{k_{el} (T_{vc} - T_0) T_L^*}{D_{eII} (C_{s,3} - C_{vc}) \Delta h_s} x_{II}^* \text{ для } 0 \leq x^* \leq 1 \text{ і } t^* = 0$$

						ДОННУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Де

$$T_L^* = \frac{a_{II\infty}L(1 - X^*)}{a_{II\infty}L(1 - X^*) + k_{eII}} \text{ для } x_{II}^* = 0 \text{ і } t^* = 0$$

Граничні умови стають:

$$\begin{aligned} \frac{dT_I^*}{dx^*} &= 0 \text{ для } x_I^* = 0 \text{ і } t^* = 0 \\ T_{II}^* - \frac{k_{eII}}{a_{II\infty}(1 - X^*)} \frac{dT_{II}^*}{dx_{II}^*} - 1 &= 0 \text{ для } x_I^* = 1 \text{ і } t^* \geq 0 \\ C^* &= f(T_S^*) \text{ для } x_I^* = x_{II}^* = 1 \text{ і } t^* \geq 0 \\ C^* &= 0 \text{ для } x_{II}^* = 0 \text{ і } t^* \geq 0 \end{aligned}$$

Скінченно-різницеві схеми рівнянь, разом з початковими і граничними умовами складають систему алгебраїчних нелінійних рівнянь, і її необхідно розв'язувати за допомогою адекватного чисельного алгоритму.

Як заморожений, так і висушений шар розділили на 20 рівних інтервалів. Отриману систему алгебраїчних нелінійних рівнянь розв'язували на кожному часовому етапі за допомогою відповідної чисельної процедури в програмному забезпеченні Mathcad.

У методі перетворення ландау фактичне положення рухомої границі X^* від часу було обчислено з розв'язку набору дискретизованих рівнянь. Фактичний середній вміст вологи в сушильному шарі W_j^* залежно від часу було обчислено як: $W_j^* = W_0^* - \Delta W^* j$, де $\Delta W^* = \Delta x^*$.

Моделювання сублімації було виконано за допомогою двох описаних вище чисельних методів:

Густини теплового потоку: q_I та q_{II} , представлені на рис. 3.3 d були обчислені на фактичному часовому етапі наступним чином: $q_i = \sum Q_{vi} \Delta x$, для $i = 1, 2$, де j позначає номер вузла в різницевій схемі. Щільність теплового потоку на фронті сублімації q_s визначали з рівнянь для фактичного кроку часу Δt і переміщення ΔX .

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

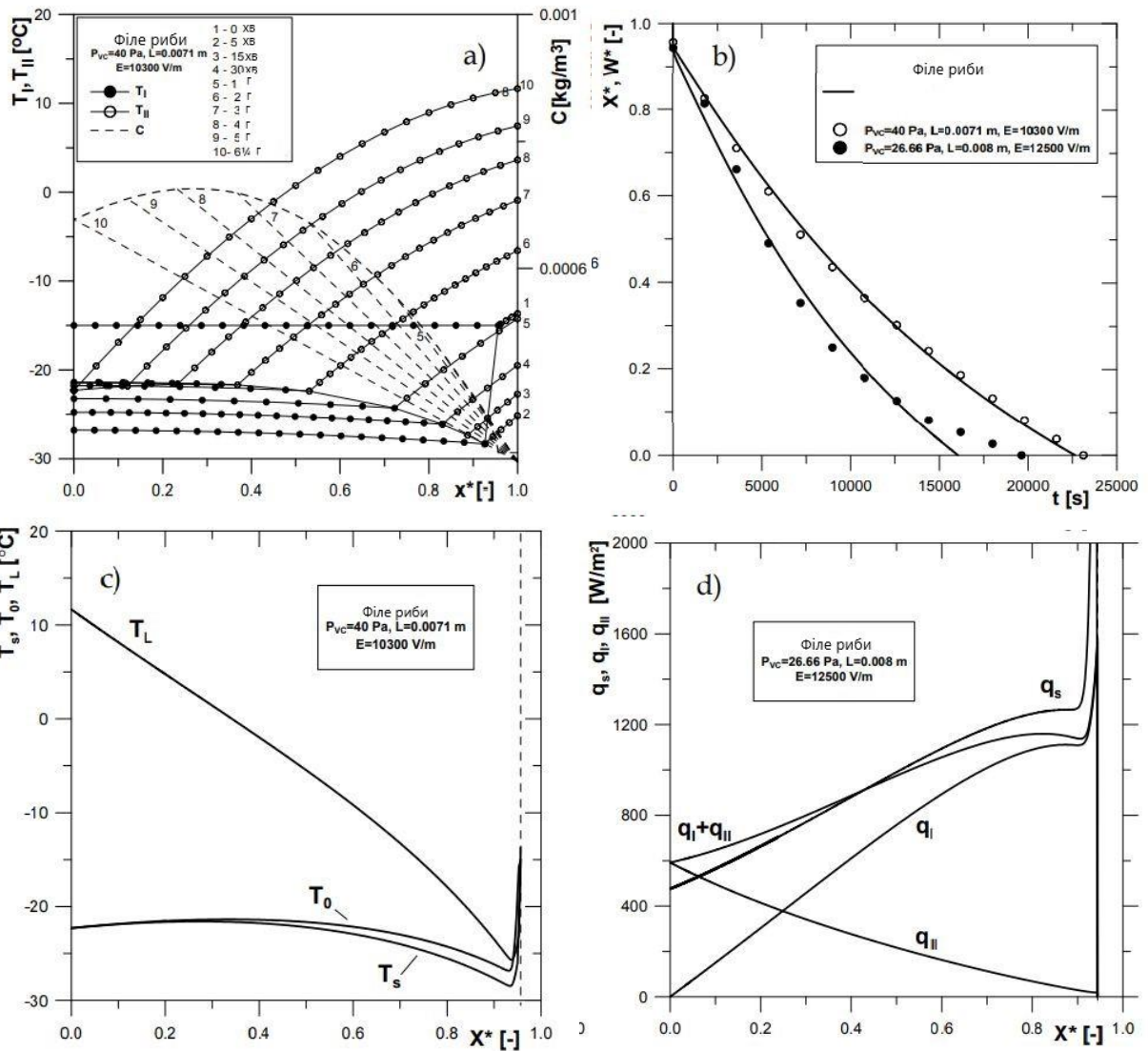


Рисунок 3.3 – Результати моделювання філе риби: а) профілі температури та концентрації парів у зразку для різних часів процесу – метод зміни кроку в часі б) крива сушіння; с) зміни температури на поверхні зразка T_L , дні зразка T_0 та сублимаційному фронті T_s в залежності від безрозмірного положення; д) щільності теплового потоку, створюваного в замороженому шарі q_i , у висушеному шарі q_{ii} і в q_s проти безрозмірного положення.

Метою цього моделювання є визначення оптимальним алгоритмом керування первинною стадією сублимацією з мікрохвильовим підводом тепла вибраних матеріалів для покращення швидкості сушіння та одночасного досягнення бажаної якості продукту. Тиск у вакуумній камері P_{vc} і мікрохвильова потужність E вважаються контрольованими факторами в системі, щоб уникнути пробою газу (коронного розряду) і плавлення. Коронний розряд виникає, коли напруженість електричного поля перевищує порогове значення. Іонізація залишкових газів у вакуумній камері призводить до великих втрат енергії та може серйозно пошкодити кінцевий продукт.

Оскільки напруженість електричного поля E пропорційна потужності, що прикладається мікрохвильовим генератором, його параметри слід контролювати під час процесу. Порогове значення електричного поля є функцією тиску в камері та має мінімум у типовому діапазоні тиску, який використовується для сублімаційної сушки (10–300 Па). Тому слід встановити верхню межу напруженості електричного поля. Інші обмеження повинні бути встановлені на максимумах температури в висушеному продукті, щоб зберегти його необхідну якість. Температура в усьому висушеному шарі повинна бути нижчою за температуру плавлення, а температура в усьому висушеному шарі не повинна перевищувати температуру опіку. Температура плавлення заморожених харчових продуктів нижча, ніж температура плавлення чистого льоду, через наявність у матеріалі розчинних хімічних сполук. Це значення зазвичай становить $-3 \div -1,5$ °С для харчових продуктів [14]. Температура підгорання висушеного шару є температурою термічної деструкції матеріалу і зазвичай становить $50 \div 60$ °С. Більш обмежувальні температурні обмеження встановлюються при мікрохвильовій сублімаційній сушці біологічних і фармацевтичних продуктів, коли біологічна активність є важливим фактором якості.

На рисунку 3.3 час висихання та максимальні температури, досягнуті в замороженій області, зображені як функція тиску у вакуумній камері при різних напруженості електричного поля для шару. Як можна бачити, час висихання сильно змінюється залежно від напруженості електричного поля і, як правило, лінійно залежить від $1/E^2$. Підвищення тиску у вакуумній камері зменшує час сушіння. Це пов'язано з поліпшенням тепловіддачі у висушеному шарі. Одночасно підвищується температура в матеріалі внаслідок більших дифузійних опорів масопередачі у висушеному шарі. Оскільки коефіцієнт дисипації лінійно залежить від температури, потужність внутрішнього джерела тепла є більшою, що передбачає інтенсифікацію процесу. Максимальні температури, досягнуті в замороженій області, показані на Рисунку 3.3, вказують на те, що збільшення тиску у вакуумній камері та напруженості електричного поля має свої обмеження, а перевищення деяких обмежень викликає плавлення. Вплив товщини зразка на час висихання при різних напруженості електричного поля показано на рисунку 3.3. Аналіз цього співвідношення дозволяє зробити висновок, що менша товщина зразка дозволить використовувати вищі напруженості електричного поля. Це повинно істотно скоротити час висихання, якщо не порушуються всі встановлені обмеження.

3.3 Розробка енергоефективного мікрохвильового обладнання для вакуумносублімаційної сушарки

Основною перевагою мікрохвильового нагріву діелектриків перед альтернативними способами енергопідведення, що дозволяє значно скоротити енерговитрати, є досить швидке рівномірне нагрівання діелектриків за рахунок

						Арк.
					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наявності внутрішніх джерел тепла безпосередньо в об'єкті, що нагрівається. Так, наприклад, мікрохвильових установках з КБВ на нерегулярному хвилеводі рівномірність розподілу внутрішніх джерел тепла забезпечується підбором геометрії камери. У КСВ застосовують дисектори і обертання об'єкта, що обробляється, а так само регулювання вологості повітря в робочій камері. У камерах променевого типу поліпшення рівномірності термообробки об'єкта можна досягти, використовуючи багатогенераторні камери, а також спеціальні поверхні, що відбивають хвилі [14]. Рівномірність термообробки, як правило, оцінюється у відсотковому співвідношенні і досягає, наприклад, 5% КБВ. Однією з основних вимог технологічного процесу є не тільки висока рівномірність розподілу температури в об'єкті, що нагрівається, але і суворе дотримання темпів нагрівання/остигання, а так само точність підтримки температури в об'єкті. Основним способом вирішення даної проблеми в мікрохвильових електротермічних установках є двопозиційне регулювання, при якому кількість енергії, що підводиться до об'єкта, що нагрівається, регулюється шляхом зміни шпаруватості роботи магнетрону. Інший спосіб регулювання подачі мікрохвильової потужності в робочу камеру - використання магнетрону з регульованим струмом анода.

Як відомо, при мікрохвильовій термообробці кількість енергії, що виділяється в глибині об'єкта, що нагрівається (за умови, що розміри об'єкта співмірні з довжиною хвилі) часто більше, ніж на поверхні. У разі можна говорити про недостатньому нагріванні поверхні об'єкта. Це знижує рівномірність нагрівання об'єкта та підвищує енергетичні витрати на технологічний процес. Вирішити цю проблему можна, керуючи розподілом внутрішніх джерел тепла в об'єкті, що нагрівається.

Розглянемо цю проблему на прикладі нагрівання плоского об'єкта у полі рупорного випромінювача (рис.3.4), розташованого в КЛТ. Математична постановка цього завдання докладно розглянута у [3,10]. На деякій відстані від об'єкта знаходиться металева стінка. В результаті відбиття від кордонів повітря-середовище та метал-повітря утворюється стояча хвиля, розподіл напруженості якої в залежності від відстані від випромінювача показано на рис. 3.5

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

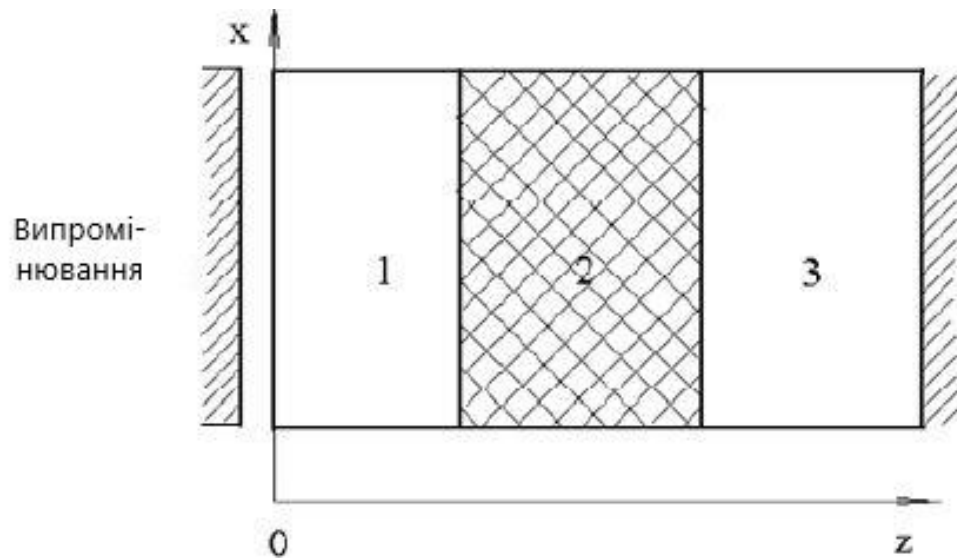


Рисунок 3.4 Поширення електромагнітної хвилі в багат шаровому середовищі:
1, 3 - повітря, 2 - об'єкт, що обробляється.

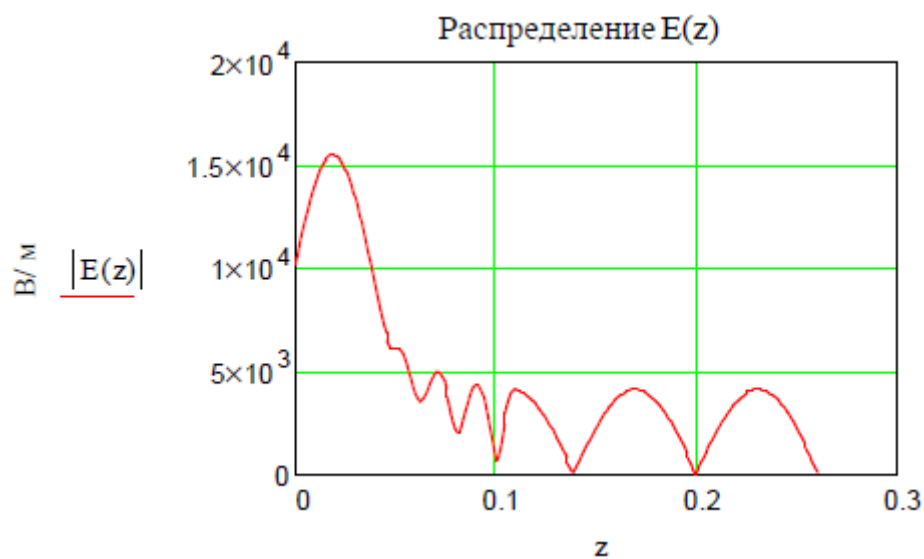


Рисунок 3.5 – Розподіл напруженості електромагнітного поля всередині об'єкту

У діелектриків з втратами при цьому виникають внутрішні джерела тепла, потужність яких визначається за формулою 3.8

$$q_v = 0,5\omega\varepsilon_0\varepsilon''tg\delta|E^2| \quad (3.8)$$

При цьому розподіл потужності джерел тепла по товщині об'єкта, що нагрівається, має характер, показаний на рис. 3.6

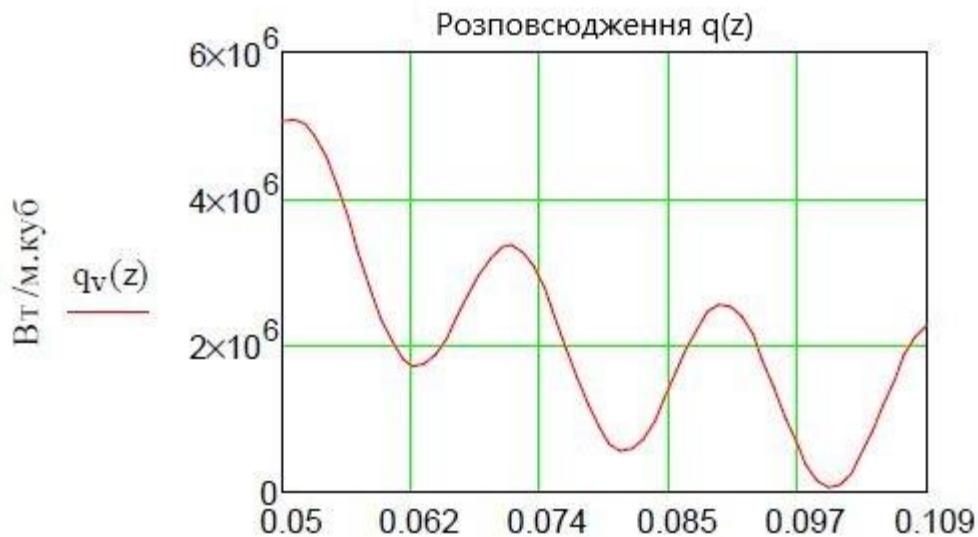


Рисунок 3.5 – Розподіл потужності внутрішніх джерел тепла за товщиною діелектрика

Змінюючи відстань від об'єкта, що нагрівається, до металевої відбиває стінки можна змінювати розподіл внутрішніх джерел тепла, а, отже, збільшити рівномірність нагріву. Діапазон зміни тепловиділення при цьому дорівнюватиме половини довжини хвилі. Найбільша різниця у розподілі внутрішніх джерел тепла буде спостерігатися при відстанях від відбивача кратних $\frac{\lambda}{4}$, де λ – довжина хвилі у просторі між діелектриком та відбивачем. На рис. 3.6 представлено розподіл внутрішніх джерел тепла при відстані до відбивача на $\frac{\lambda}{4}$ більше ніж на рис. 3.5

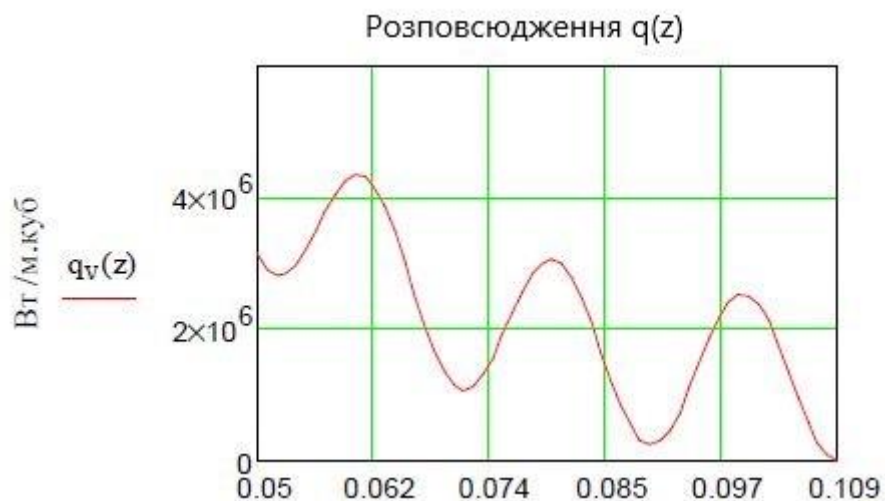


Рисунок 3.6 – Розподіл потужності внутрішніх джерел тепла за товщиною діелектрика при збільшеній відстані до відбивача на $\frac{\lambda}{4}$

Таким чином, при конструюванні мікрохвильових електротермічних установок променевого типу можна здійснити управління внутрішніми джерелами тепловиділення. На рис.3.7 представлений варіант конструкції робочої камери періодичної дії з плавним регулюванням відстані до металевого відбивача. Як механізм переміщення об'єкта в даному випадку використовується гідропривід.

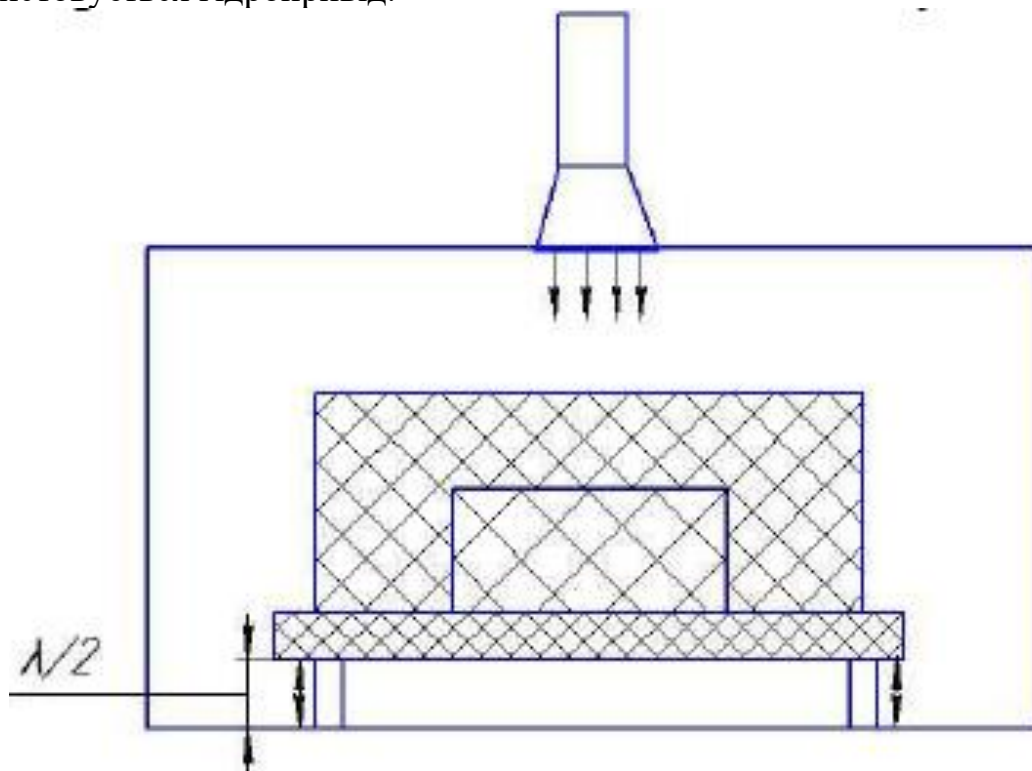


Рисунок 3.7 – Камера променевого типу зі змінною відстанню до поверхні, що відбиває (періодичний режим роботи)

При конструюванні робочої камери променевого типу, що працює в методичному режимі, можна використовувати кілька випромінюючих систем з різними відстанями від об'єкта до відбивача (рис. 3.8).

Для забезпечення симетрії теплового розподілу НВЧ енергія подається до об'єкта з двох сторін, відбивачі розташовані на різних відстанях від об'єкта, що нагрівається, на відстані $\frac{\lambda}{4}$.

І один від одного.

						ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

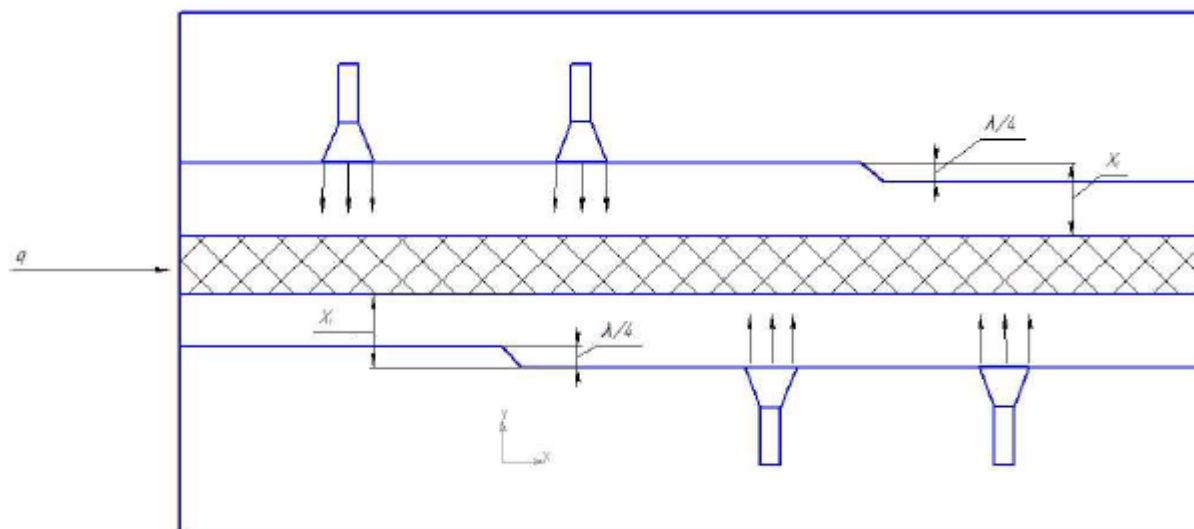


Рисунок 3.8 – Камера променевого типу з чотирма випромінюючими антенами і різними відстанями від об'єкта, що обробляється до поверхні, що відбиває (методичний режим роботи)

При розробці робочих камер променевого типу з регульованими джерелами тепловиділення в першу чергу необхідно розрахувати початкову відстань від об'єкта до площини, що відбиває. На мій погляд, ця відстань має бути обрана таким чином, щоб максимум тепловиділення припадав на поверхневі шари діелектрика. Це дозволить компенсувати теплові втрати у навколишнє середовище і, зрештою, збільшити рівномірність нагріву. При цьому цю відстань слід мінімізувати для зменшення металоємності конструкції та розмірів робочої камери.

Підвищення енергетичної ефективності термообробки діелектриків у мікрохвильовому електромагнітному полі можливо досягти шляхом збільшення рівномірності тепловиділення. Для цього пропонується в установках з камерами променевого типу передбачати можливість плавного регулювання відстані від об'єкта до стіни, що відбиває, а також від випромінювачів до об'єкта.

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

В процесі написання кваліфікаційної роботи були одержані:

1. Опис фізичного та математичного процесу сублімаційного сушіння.
2. Досліджено загальний вид сублімаційного сушіння. Наведена конструкція найбільш вживаної сублімаційної сушарки. Розраховано тепловий баланс вакуумно-сублімаційної сушарки
3. Розроблено математичну модель первинної стадій сублімаційного сушіння філе риби при мікрохвильовому нагріванні.
4. Були представлені теоретичні дослідження первинної сублімаційної сушки при мікрохвильовому нагріванні для філе риби. Кінетика процесу мікрохвильового сублімаційного сушіння покращується (покращується якісні показники продукту, що дозволяє зберегти найвищий вміст вітамінів, мінералів, і довготривалий час зберігання) порівняно з сублімаційним сушінням при звичайному нагріванні. Це викликано головним чином тим фактом, що при звичайному нагріванні (наприклад, контактному або радіаційному) градієнти температури та масопередачі у висушеному матеріалі мають протилежні напрямки. Також це призвело до економії енергозатрат завдяки нагріванню безпосередньо філе риби а не деко та інших супутніх предметів. Навпаки, у процесі сублімаційного сушіння при мікрохвильовому нагріванні обидва градієнти температури та масопередачі є паралельними. Це дуже зручне явище з точки зору якісних властивостей остаточно висушеного матеріалу. Припущення про постійну напруженість електричного поля у висушеному матеріалі справедливе для розмірів зразка до порядку половини довжини хвилі в моноmodalьних резонансних порожнинах. Сформульована математична модель також може бути застосована при мікрохвильовому нагріванні зразків розмірами кратними довжинам хвиль в мультимодальних аплікаторах з рівномірним розподілом напруженості електричного поля.
5. Запропонована конструкція камери сублімації для зменшення втрат завдяки елементам відбивання хвиль.
6. Дана робота підводить до інших досліджуваних робіт, а сама на виконання конструкторської роботи мікрохвильового підводу до сублімаційної камери, також розробка управління мегатроном в процесі сублімації, розробка термодатчика для виміру температури матеріалу сушіння при впливі електромагнітного поля.

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.С		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Кухта				Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.	Хорольский						
Н. Контр.	Омельченко				Висновки		
Затверд.	Цвіркун						

Список використаної літератури

1. ДСТУ 7972:2015 «Риба та рибні продукти. Правила приймання, методи відбирання проб»
2. Ліофілізація [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%96%D0%BE%D1%84%D1%96%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F> (дата звернення: 1.10.2022)
3. Гірка І. О. Теоретичні основи вакуумної техніки / І. О. Гірка, С. І. Кононенко, М. М. Юнаков. – Харків: Навчальний посібник, 2009. – 53 с.
4. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – М. Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.
5. Гинзбург, А.С. Массовлагодобменные характеристики пищевых продуктов / А.С. Гинзбург, І.М. Савина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.
6. Магнетрон [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD>. (дата звернення: 10.10.2022)
7. ПОБУТОВА СУБЛІМАЦІЙНА СУШАРКА : пат.) МПК F26B 5/14 (2006.01) Україна : UA 96772 U. № u 2014 10675 ; заявл. 29.09.2014 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. 4 с.
8. Вакуумно-сублімаційна сушарка : пат. F26B 5/00 Україна. № 59107 ; заявл. 08.08.2003 ; опубл. 02.12.2004, Бюл. № 4. 5 с.
9. Рогов І. А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / І. А. Рогов, С. В. Некрутман.. – М: Агропромиздат, 1986. – 351 с.
10. Визначення термодинамічних параметрів води і водяної пари. Таблиці та діаграми термодинамічних властивостей води і водяної пари. Основні термодинамічні процеси водяної пари, їх дослідження. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/8868> (дата звернення: 10.11.2022).
11. Хиппель, А. Диэлектрики и волны / А. Хиппель. – М.: Наука, 1960. – 360 с.
12. Mann С.А. Mechanism of dielectric drying / С.А. Mann, N.H. Geagl-sre, А. S. Oslon. Industr. Eng Chem. 8. 1949, p. 1686 1964.
13. Ликов, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Ликов. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – 464 с.
14. Ликов, А.В. Тепломассобмен / А.В. Ликов. – М.: Энергия, 1978. – 478 с.
15. Основні термодинамічні процеси водяної пари [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://lektsii.org/15-11683.html>.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ					

16. Некрутман С. В. Диэлектрические свойства пищевых продуктов на частоте 2375 МГц / С. В. Некрутман. // Электронная обработка материалов. – 1973. – №4. – С. 82–84.
17. Воскресенский Н. А. Замораживание и сушка рыбы методом сублимации / Н. А. Воскресенский. // Рыбное хозяйство. – 1963. – С. 136–142.
18. Гухман А. П. Об особенностях теплообмена при сублимации льда в вакууме / А. П. Гухман, Е. А. Ермакова. // Техническая физика. – 1953. – №8. – С. 34
19. Алексанян И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пе-носушка. Теория. Практика. Моделирование. / И. Ю. Алексанян, А. А. Буйанов. – Астрахань: АГТУ, 204. – 380 с.
20. Махней О. В. Математичне моделювання : навчальний посібник / О. В. Махней. — Івано-Франківськ : Супрун В. П., 2015. — 372 с.
21. Амелькин В. В. Дифференциальные уравнения в приложениях / В. В. Амелькин. — М. : Едиториал УРСС, 2003. — 208 с
22. Бартиш М. Я. Дослідження операцій. Частина 5: Моделі з чинником часу / М. Я. Бартиш, І. М. Дудзяний. — Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. — 256 с.
23. Введение в математическое моделирование / Под ред. П. В. Трусова. — М. : Логос, 2005. — 440 с.
24. Лоскутов А. Ю. Введение в синергетику / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. — М. : Наука, 1990. — 272 с
25. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. — Черкаси : ЧДТУ, 2009. — 399 с.
26. Томашевський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашевський. — К. : Видавнича група ВНУ, 2005. — 352 с.

					ДонНУЕТ. 133.ГМБ-21м.2022.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

