

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

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Холодильні машини і установки»
_____ Омельченко О.В.
« ____ » _____ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»
за освітньою програмою «Холодильні машини і установки»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ ФРУКТІВ ТА
ОВОЧІВ»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____

Іванов Артем Ігорович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

_____ (підпис)

Керівник:

ст. викладач, к.т.н., Гончаренко В.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Здобувач вищої освіти _____

_____ (підпис)

Кривий Ріг
2026

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

Форма здобуття вищої освіти денна
Ступінь бакалавр
Галузь знань Енергетична інженерія
Освітня програма Холодильні машини і установки

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Холодильні
машини і установки»

Омельченко О.В.
« » 2026 року

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

Іванову Артему Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення холодильного обладнання для
інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів»

Керівник роботи к.т.н., Гончаренко В.А.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

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

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

3. Вихідні дані до роботи:

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

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Аналіз обладнання для заморожування фруктів та овочів.
3. Проектування тунелю для заморожування фруктів та овочів.
4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Тунелі для заморожування продуктів харчування.

Удосконалення статичного тунелю для заморожування фруктів та овочів.

6. Дата видачі завдання «02» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для заморожування фруктів та овочів	16.02.2026-10.03.2026
3	Проектування тунелю для заморожування фруктів та овочів	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Іванов А.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Гончаренко В.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 12 рисунків, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 29 найменувань.

Об'єкт роботи – статичний тунель для заморожування.

Предмет роботи – процес заморожування фруктів та овочів.

Мета роботи – удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів.

У роботі зазначено, що заморожування – це спосіб довготривалого зберігання сировини, що краще зберігає зовнішній вигляд, смак і поживну цінність. Проте можливий нерівномірний розподіл повітря в холодильному обладнанні, що може призвести до нерівномірного часу заморожування, що вимагає модернізації, яка повинна бути спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту. Оптимізовано статичний тунель процесу роботи якого ґрунтується на заморожуванні продуктів за допомогою примусового повітря. Для системи заморожування обрано конденсаторний блок, який разом з випарником працюватиме з холодопродуктивністю 11,05 кВт при температурі випаровування $-29,7^{\circ}\text{C}$.

Запропоновано систему, яка включає дві підсистеми: перша для контролю процесу та досягнення точки замерзання, друга для стабілізації продукції при температурах нижче -18°C . Лотки будуть оснащені датчиками, які будуть контролювати температуру заморожування у зв'язку з можливим нерівномірним розподілом повітря в статичному тунелі. У випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад третій з п'яти, це буде фіксуватися та стабілізуватися другою підсистемою за допомогою засобів автоматизації. Лоток в тунелі, який має найнижчу швидкість повітря і найнижчі температури показники повітря навколо продукту потребують найбільшого часу для заморожування. Лоток, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Система автоматизації надасть сигнал про завершення циклу лише тоді, коли самий теплий лоток досягне цільової температури, а саме -18°C .

Оптимізація спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, щоб підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами за рахунок:

- впровадження реверсивного обдування, а саме застосування осьових вентиляторів із циклічною зміною напрямку потоку кожні 15-30 хвилин, що забезпечуватиме заморожування на ближніх і дальніх полицях;

- оснащення контейнерів стрічковими переміщувачами з датчиками, які у випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад, третій з п'яти піднімати його ближче до вентиляторів;

- застосування частотного регулювання компресорів та вентиляторів за рахунок зниження обертів двигунів на фінальній стадії заморожування, коли теплове навантаження від продукту падає, що сприятиме економії енергії;

КЛЮЧОВІ СЛОВА: заморожування, статичний тунель, випарник, компресор, конденсатор, система автоматизації, температурні датчики.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ ФРУКТІВ ТА ОВОЧІВ	7
1.1 Технології заморожування в харчовій промисловості	7
1.2 Традиційні системи заморожування	9
1.3 Нові тенденції в технології заморожування	14
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ СТАТИЧНОГО ТУНЕЛЮ ДЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ	21
2.1 Вибір обладнання для холодильної системи	21
2.2 Енергетичний аналіз та вибір системи охолодження	26
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1 Оптимізація повітряного потоку в тунелі для заморожування	39
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Іванов				Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів	Літ.	Арк.
Перевір.	Гончаренко						Аркушів
						5	1
Н. Контр.	Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
Затверд.	Омельченко						

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що заморожування – це спосіб довготривалого зберігання сировини, що краще зберігає зовнішній вигляд, смак і поживну цінність. Проте можливий нерівномірний розподіл повітря в холодильному обладнанні, що може призвести до нерівномірного часу заморожування, що вимагає оптимізації, яка повинна бути спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, щоб підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів.

Практична та наукова новизна. Оптимізовано статичний тунель процес роботи якого ґрунтується на заморожуванні продуктів за допомогою примусового повітря. Для системи заморожування обрано конденсаторний блок, який разом з випарником працюватиме з холодопродуктивністю 11,05 кВт при температурі випаровування $-29,7^{\circ}\text{C}$.

Запропоновано систему, яка включає дві підсистеми: перша для контролю процесу та досягнення точки замерзання, друга для стабілізації продукції при температурах нижче -18°C . Лотки будуть оснащені датчиками, які будуть контролювати температуру заморожування у зв'язку з можливим нерівномірним розподіл повітря в статичному тунелі. У випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад третій з п'яти, це буде фіксуватися та стабілізуватися другою підсистемою за допомогою засобів автоматизації. Лоток в тунелі, який має найнижчу швидкість повітря і найнижчі температури показники повітря навколо продукту потребують найбільшого часу для заморожування. Лоток, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Система автоматизації надасть сигнал про завершення циклу лише тоді, коли самий теплий лоток досягне цільової температури, а саме -18°C .

Оптимізація спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, щоб підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами за рахунок:

- впровадження реверсивного обдування, а саме застосування осьових вентиляторів із циклічною зміною напрямку потоку кожні 15-30 хвилин, що забезпечуватиме заморожування на ближніх і дальніх полицях;
- оснащення контейнерів стрічковими переміщувача з датчиками, які у випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад, третій з п'яти піднімати його ближче до вентиляторів;
- застосування частотного регулювання компресорів та вентиляторів за рахунок зниження обертів двигунів на фінальній стадії заморожування, коли теплове навантаження від продукту падає, що сприятиме економії енергії.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Іванов			Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів			Літ.	Арк.	Аркуші	
Перевір.		Гончаренко								6	1
								ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			
Н. Контр.		Омельченко									
Затверд.		Омельченко									

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ ФРУКТІВ ТА ОВОЧІВ

1.1 Технології заморожування в харчовій промисловості

Заморожування використовувалося ще в давнину як метод збереження продуктів харчування. Процес уповільнює деградаційну активність мікроорганізмів і дозволяє зберігати продукти протягом тривалого часу. Заморожування має походження в Китаї, де вже в 1000 році до н.е. будували льодові погребі для збереження продуктів. Пізніше греки та римляни зберігали продукти в коморах, де сніг утрамбовувався. У другій половині XIX століття в Сполучених Штатах Америки почали заморожувати рибу, використовуючи сіль і лід для зниження температури. Цей метод став основоположним для промисловості, яка почала заморожувати як яловичину, так і птицю, що дозволяло транспортувати їх протягом тривалого часу. Переломним моментом у роздрібному продажі заморожених продуктів стало 1930-ті роки, коли американська компанія пропонувала понад 26 видів овочів, м'яса, риби та фруктів [2, 6]. Почала розвиватися концепція швидкого заморожування для забезпечення утворення менших кристалів льоду з метою максимізації якості заморожених продуктів. Для деяких видів продуктів застосовувалась техніка «бланшування» – швидка термічна обробка, що використовується для інактивації ферментів, які можуть пошкодити органолептичні властивості під час зберігання. Бланшування особливо застосовують до овочів на короткі терміни від 1 до 10 хвилин, при температурах близько 75-95°C.

Застосування концепцій тепла та масопереносу до сировини історично здійснювалося найчастіше через заморожування харчових продуктів. Інженери повинні знати ці принципи, щоб оцінити, спроектувати та обрати правильний процес і обладнання заморожування, визначаючи вимоги до потужності системи. Довготривале збереження їжі, що тривало місяцями або роками, зазвичай передбачає заморожування. Основна ідея полягає в тому, що знизивши температуру сировини до $18\pm 3^{\circ}\text{C}$ або нижче (нормальна цільова комерційна температура замерзання), більшість води та деякі розчинені речовини кристалізуються у лід [1-3, 11]. Цього досягають за допомогою ідей відчутного та прихованого тепла. Заморожування інших типів матеріалів, що містять воду, також підпадає під ці правила. Уповільнюючи швидкість фізичних, хімічних, метаболічних і мікробіологічних реакцій, заморожування допомагає зберегти сировину. Коли температура сировини знижується або охолоджується, вода, що міститься в їжі, стає менш доступною для участі в будь-якій із цих реакцій внаслідок фазового переходу від рідкої води до льоду. Тому заморожений продукт є більш стабільним і здатним зберігати свої

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Іванов				Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів	Літ.	Арк.
Перевір.	Гончаренко						Аркушів
							7 14
Н. Контр.	Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
Затверд.	Омельченко						

відмінні характеристики під час транспортування та зберігання.

Існує велика різноманітність продуктів харчування, таких як фрукти та овочі, м'ясо, морепродукти, молочні продукти та готові страви (такі як морозиво), які можуть зберігатися довше за допомогою заморожування. Через великий попит на заморожені продукти харчування важливо добре знати термофізичні характеристики таких продуктів і механіку процесу заморожування [1-3]. Фрукти та овочі є відмінними джерелами життєво важливих поживних речовин, таких як вітаміни, мінерали, антиоксиданти та багато фітохімічних компонентів, відіграючи вирішальну роль у збалансованому харчуванні та маючи численні корисні для здоров'я властивості. На відміну від продуктів тваринного походження, фрукти та овочі вважаються живими організмами навіть після збирання, оскільки вони продовжують дихати та виконувати різноманітні метаболічні процеси на клітинному рівні. Тому належне збереження перед споживанням є надзвичайно важливим для захисту цілісності клітинної структури, а також життєздатності клітин для рослинних клітинних продуктів.

Високий вміст води ускладнює тривале збереження якості. Вміст води більшості фруктів і овочів коливається від 70% до 95% за винятком 10%–20% ваги вологих і сухих культур відповідно. Оскільки свіжі овочі не є стерильними, високий вміст води досить сприяє мікробній активності та ферментативним реакціям у клітинах, які, якщо їх доповнити відповідними температурами, можуть дуже легко призвести до руйнування та псування фруктів і овочів. Щоб мінімізувати втрати сировини та відходи, спричинені неправильним зберіганням фруктів і овочів після збору врожаю, а також отримати якісні фрукти та овочі незалежно від часу, важливо знаходити ефективні, прості та недорогі методи збереження.

Заморожування є широко використовуваною технологічною операцією, що передбачає видалення прихованого тепла та кристалізацію льоду при низьких температурах, і яка відіграє важливу роль у тривалому збереженні продуктів харчування. Воно вважається найбільш придатним методом для збереження поживної цінності та сенсорних властивостей свіжих фруктів і овочів. З одного боку, низькі температури зменшують метаболічну активність, а також пригнічують мікробну активність [5]. Крім того, через замерзання води у фруктах та овочах, вода, необхідна для росту мікроорганізмів, біохімічних та фізікохімічних реакцій, втрачає рухливість обмеження і більше не доступна, що перешкоджає росту руйнівних і патогенних мікроорганізмів. Хоча різні процеси всередині продукту сповільнюються при низьких температурах, відповідні ферменти та мікроорганізми все ще перебувають у латентному стані, але не повністю «заморожені до смерті». Тому зазвичай потрібні стабільні умови зберігання та температури холодного ланцюга, щоб успішно заморозити продукт і забезпечити кращу якість до моменту його споживання.

Заморожування – це термодинамічний процес під час якого речовина переходить із рідкого стану в твердий через зниження температури нижче точки замерзання. Під час замерзання молекули або атоми речовини сповільнюють свою кінетичну енергію, зближуючись один з одним і

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

утворюючи регулярну тверду структуру [6]. У процесі цього температура залишається стабільною, поки весь матеріал не застигає, після чого температура починає додатково знижуватися. Замерзання є важливим процесом у багатьох сферах, таких як зберігання продуктів харчування, виробництво льоду та кріозбереження клітин і тканин. Під час замерзання важливо контролювати швидкість охолодження, щоб уникнути утворення великих кристалів льоду, які можуть пошкодити продукти або речовини.

Важливо відзначити різницю між замерзанням чистої води та водних розчинів. У першому випадку температура підвищується до 0°C , точки замерзання, при якій відбувається фазовий перехід. Потім відбувається період, протягом якого існують одночасно як рідка так і тверда фази. Наприкінці цього періоду вся вода перетворюється на лід і температура продовжує знижуватися. У другому випадку процес починається за температури нижчої від точки замерзання чистої води, оскільки присутні розчинені солі. Коли температура досягає точки замерзання, лише розчинник змінює свій стан. З часом, у міру утворення кристалів льоду, солі концентруються в залишковому розчині, створюючи криву, яка має на своїх кінцях точку, де вода починає замерзати та точку, де твердіють також солі [3, 6]. У обох випадках процес проходить у два етапи: нуклеація під час якої утворюються перші кристали льоду та етап зростання під час якого кристали збільшуються в розмірах. Швидкість утворення кристалів також визначає їхню кінцеву кількість. Чим більше кристалів, тим менше механічного пошкодження наноситься клітинним стінкам.

Перед досягненням стадії заморожування існує період, який називають пересиченням або переохолодженням під час якого температура знижується значно нижче точки замерзання. Ступінь переохолодження впливає на утворення кристалів льоду. Чим більший ступінь переохолодження тим більше теплоти кристалізації може поглинути пересичений розчин, прискорюючи таким чином процес заморожування. Отже, чим нижча температура і чим швидше розчин її досягає тим кращим буде остаточне заморожування. З меншою кристалічною структурою та більшою кількістю ядер. Процес заморожування складається з чотирьох етапів: передзаморожування, перенасичення, етап заморожування та етап глибокого заморожування. На першому етапі тепло видаляється з продукту до досягнення точки замерзання. На другому етапі температура опускається нижче значення замерзання. Під час третього етапу видаляється приховане тепло і вода перетворюється на лід. На останньому етапі температура об'єкта знижується до температури зберігання.

1.2 Традиційні системи заморожування

Індустрія холодильної промисловості постійно розвивається, задля удосконалення систем збереження продуктів харчування через зростаючий попит на продукти, особливо коли їх потрібно транспортувати на великі відстані. Внаслідок цього морозильні тунелі стали швидким, доступним і ефективним варіантом, який став необхідним для таких галузей, як харчова

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промисловість. У промисловості використовують швидкозаморожувальні тунелі, заморожування продукту відбувається на максимальній дозволений швидкості до досягнення температур від -10°C до -15°C [6-8]. Заморожування сировини відбувається за традиційними методами, оскільки чим вища швидкість заморожування, тим менший розмір кристалів, що утворюються всередині сировини, а з іншого боку, чим нижча швидкість заморожування, тим більші кристали утворюються всередині матеріалу. Заморожувальні тунелі, засновані на системі швидкого охолодження, змінили широкий спектр послуг, підвищивши рівень продуктивності та прибутковості багатьох компаній. При проєктуванні цих тунелів враховуються вимоги кожного сектора. Вони можуть варіюватися від великих систем для збільшення виробничих потужностей до малих потужностей для сімейного бізнесу. Це дозволило запропонувати продукт з такою ж поживною цінністю, як і свіжий, і з збереженими якістю

У промислових та комерційних середовищах, особливо в агропродовольчій промисловості, тунель заморожування є обладнанням для заморожування, яке працює швидко та точно, тобто тип промислової машини, здатної швидко заморожувати будь-яку сировину. Морозні тунелі – це герметичні конструкції з матеріалів найвищої якості. Панелі з нержавіючої сталі та алюмінію складають основну частину конструкції і саме там продукт замерзає [6, 8, 11]. Контроль теплоізоляції та мінімізація втрат від холоду є надзвичайно важливими протягом усього виробництва. Ще одним важливим фактором для його проєктування та виробництва є легкість доступу для очищення та обслуговування. Загальна структура тунелів для замерзання при вибуховому заморожуванні складається з серії турбомашин, таких як конденсатори, випарники та компресор. Для того, щоб процес заморожування проходив на найкращому рівні, потрібні потужні системи вентиляції та випаровування, які потрібно точно контролювати та оптимізувати. Оцінюючи ефективність обладнання для заморожування, важливо також враховувати систему розморожування теплообмінника, процедури очищення тунелів при замерзанні та технічне обслуговування обладнання.

Основний принцип, за яким використовується ця технологія заморожування, зводиться до того, що швидке заморожування перешкоджає утворенню великих кристалів льоду, які розривають тканини. При зворотному процесі втрачається менше води, і продукти довше залишаються свіжими в морозильній камері. Конструкції цих приладів зазвичай модифікуються для задоволення вимог харчової промисловості, і використовуються матеріали, які не псуватимуть ці делікатні продукти. Температура в звичайній комерційній морозильній камері коливається від -30°C до -50°C , а відносна вологість камери – від 85% до 90%. Кожен продукт має певний час заморожування. Процес складається з наступних етапів [7, 11]:

1. Підготовка продукту: продукти харчування або інші товари, які потрібно швидко заморозити, готуються заздалегідь і розміщуються на підносах, конвеєрних стрічках чи іншому обладнанні, що дозволяє їх постійну експозицію до умов охолодження.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

2. Введення в тунель: готові продукти поміщаються в тунельну морозильну камеру, де вони піддаються впливу дуже низьких температур і високої відносної вологості.

3. Охолодження конвекцією: конвекційне охолодження, при якому дуже холодне повітря примусово обтікає товари і проходить через них є основним методом швидкого заморожування. Сучасні холодильні системи використовують холодоагенти, випарники та охолоджувальні змійовики для генерації цього холодного повітря.

4. Передача тепла: під час цього процесу внутрішнє тепло продуктів передається холодному повітрю зовні. Температура продуктів швидко знижується при відведенні тепла.

5. Утворення дрібних кристалів: через високу швидкість заморожування всередині продуктів зазвичай утворюються дрібні кристали льоду. У порівнянні з більшими кристалами, що утворюються при повільнішому заморожуванні, ці кристали менш шкідливі для клітинної структури та якості продуктів.

6. Контроль часу та температури: щоб гарантувати, що продукти досягають правильної температури, не втрачаючи при цьому жодних властивостей якості, ретельно регулюється час перебування в тунелі заморожування. Відповідно до вимог клієнта, вимірюється та змінюється температура всередині тунелю.

7. Витяг і зберігання: товари виймаються з тунелю та зберігаються у наднизьких температурах до моменту використання або розподілу, після досягнення необхідної температури заморожування.

Тунелі швидкого заморожування працюють на принципі високих швидкостей заморожування, що дозволяє швидко утворювати дрібні кристали льоду, що допомагає зберегти якість продуктів харчування. Це пояснюється тим, що дрібні кристали льоду мають багато переваг при зберіганні продуктів, таких як збереження поживної цінності, менше виділення рідини, збереження зовнішнього вигляду та кольору, зменшення втрати ваги, покращення сенсорної якості, більший термін зберігання та менше небажане повторне зволоження під час розморожування. Ця складна технологія заморожування має низку значних переваг, які впливають на якість, безпеку та ефективність заморожування продуктів. Переваги технології заморожування [9, 11]:

- збереження поживної якості: мінімізуючи ріст великих кристалів льоду в сировині, швидке заморожування зберігає цілісність клітин і зменшує втрату життєво важливих поживних речовин, щоб зберегти поживну цінність сировини, необхідне швидке заморожування;

- підтримка зовнішнього вигляду: швидке утворення кристалів льоду запобігає утворенню великих кристалів, які можуть пошкоджувати клітини та змінювати зовнішній вигляд матеріалу;

- ефективність процесу: порівняно з традиційними методами заморожування, тунелі з вибуховим заморожуванням дозволяють значно скоротшувати періоди обробки. Результатом цієї ефективності є зростання продуктивності та збільшення виробничих потужностей;

- зменшення кількості мікроорганізмів: швидке заморожування зменшує

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ріст мікроорганізмів і активність ферментів, які можуть відбуватися при вищих температурах, що збільшує термін зберігання продукту та підвищує безпеку харчових продуктів;

- зменшення ваги: швидке заморожування мінімізує втрату рідини та поживних речовин під час розморожування. Внаслідок цього кінцевий продукт втрачає найменшу вагу, що має користь як для харчування, так і для бізнесу;

- відповідність нормативним вимогам: знижуючи ризики мікробіологічного розвитку та деградації продукції, швидке заморожування відповідає нормам безпеки харчових продуктів.

В даний час можливо виготовляти тунелі для заморожування, спеціально пристосовані до потреб кожного типу промисловості залежно від рівнів виробництва (обсягу продукції та потоку вантажів), характеристик самої продукції та фізичних потужностей підприємства. Тунелі заморожування можна класифікувати за логістикою, підготовкою продукту, рухом продукту всередині камери та рухом повітря. Тунелі ультразаморожування, які використовуються в харчовій промисловості для збереження продуктів за використаною логістикою поділяються на [7-9, 11]:

Безперервні. У системах швидкого заморожування, відомих як безперервні тунелі заморожування, продукти транспортуються протягом короткого періоду заморожування. Вони мають перевагу швидкого заморожування продукту та дозволяють попередню обробку перед заморожуванням. Безперервні тунелі заморожування можуть використовуватися для збереження якостей продукту. Спіральні тунелі заморожування, каскадні тунелі заморожування або тунелі на лотках, тунелі заморожування з перетягуванням тощо – це інші види тунелів, що входять до цієї категорії.

Статичні або пакетні. Це невеликий простір, який потребує від однієї до трьох годин для повного заморожування. Швидкозаморозник – ще одна з його назв. Статичні тунельні морозильники пропонують переваги швидкого заморожування продукту, низьких експлуатаційних витрат та застосування для таких товарів, як риба, морепродукти, м'ясо та готові страви, серед іншого.

Тунелі ультраморозильної заморозки, що використовуються в харчовій промисловості для збереження продуктів, залежно від способу підготовки продукту [7-9, 11]:

Індивідуальна швидкозаморозка – це метод, який дозволяє окремо глибоко заморожувати продукт після етапу нарізки або розділення. Якість та структура товарів зберігаються при розморожуванні в заморожуючих тунелях, тому, що кристали льоду, які утворюються в клітинах продуктів, що заморожуються є крихітними.

Тунелі ультразамороження, що використовуються в харчовій промисловості для збереження продуктів залежно від руху продукту [7-9, 11]:

Стаціонарний продукт – це прості системи у яких продукт розміщується партіями або на піддонах працівниками і залишається нерухомим у тій самій позиції протягом усієї обробки (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Тунелі заморожування зі статичним продуктом

Продукт у русі – це метод швидкого заморожування, який використовує конвеєрні стрічки, які можуть бути як горизонтальними, так і вертикальними, для переміщення продукту (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Тунелі заморожування з продуктом у русі

Тунелі ультразаморожування, що використовуються в харчовій промисловості для збереження продуктів, відповідно до руху повітря [7-9]:

- примусово вентилязовані або з примусовим повітрям, у цьому типі тунелів використовуються вентилятори, щоб повітря циркулювало навколо продуктів, тобто холодне повітря примусово змушене циркулювати по камері;
- пряме повітря, де повітря викидається безпосередньо з охолоджувачів у камеру, тобто холодне повітря контактує з продуктами без використання великих вентиляторів (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Тунелі заморожування з прямим потоком повітря

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ

Арк.

13

Вибухове заморожування широко використовується для заморожування упакованих товарів на піддонах. Перевага тунелів для вибухового заморожування полягає в тому, що велика кількість продуктів може бути заморожена з відносно малою кількістю людських ресурсів. Свіжі продукти пакують у лотки та розміщують на піддонах виробником і транспортують для заморожування спеціальною заморожуваною компанією, яка розміщує піддони у тунелях для заморожування з вибуховим заморожуванням, кожен з яких може містити до 40–50 тон продукції. Морозильник має типову довжину від 15 до 20 метрів, а висота – три-чотири ряди піддонів. Потім тунель заповнюють продуктом, який заморожують партійно [22]. Випарники та вентилятори в морозильній камері контролюють циркуляцію повітря та температуру. Вентилятор засмоктує холодне повітря з випарника і спочатку пропускає його через 10 піддонів. Потім повітря змінює напрямок у камері реверсу і проходить через ще 10 піддонів на шляху назад до випарника. Холодоагент у спіралі – аміак, а система холодильної системи – це звичайна двоступенева промислова аміачна установка. Об'єм повітря в цьому тунелі становить 23 400 м³/год (6,5 м³/с).

1.3 Нові тенденції в технології заморожування

Наразі найпоширенішим методом зберігання продуктів харчування є заморожування, яке безумовно є найкращим методом для збереження органолептичних властивостей порівняно з висушуванням та консервуванням. Однак воно має свої протипоказання, оскільки структура продукту часто змінює свою структуру, особливо під час тривалого заморожування. Також з часом зменшуються органолептичні властивості, як і біоактивні сполуки, такі як аскорбінова кислота та загальні поліфеноли, які є важливими для антиоксидантної діяльності нашого організму [6, 13-15]. Заморожування, як відомо, має просту функцію, а саме зниження температури нижче точки замерзання дрібних продуктів до повного проходження води та розчинів, присутніх всередині. Процес доходить до постійного тиску, але змінює об'єм на висоту займає більший простір, занурюючи воду. Це спричиняє пошкодження клітинної структури. Текстура та густі компоненти не піднімаються і це відбувається через деякий час, коли сировина заморожується. Щоб подолати цю проблему застосовується технологія «ізохорне заморожування» або «заморожування за допомогою ізохорної системи» при цьому цілі вимагають збереження постійного тиску. На відміну від закону збереження постійного тиску, у цьому випадку це відбувається при постійному об'ємі, що можливо завдяки камері, яка безшумно подається всередину середовища, де присутня сировина та вода з розчиненою розчиненою речовиною.

Традиційні процеси заморожування використовують ізобаричну концепцію, при якій коливання об'єму та температури синхронізовані. Ізобарична система заморожує необмежену кількість рідини в сировині. Утворення кристалів льоду в їжі пошкоджує клітинну структуру продуктів. Ізохорне заморожування може запобігти втраті цілісності клітини, обходячи

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такі обмеження. Під час ізохорного замерзання об'єм системи залишається сталим, тоді як інші елементи, такі як температура і тиск, змінюються одночасно.¹ Використання технологій в ізохорному заморожуванні є надзвичайно важливим. Герметичний контейнер, розташований у морозильній камері, слугує ізохорною системою заморожування [11, 13-15]. Це простий у використанні та надійний пристрій, який не потребує обслуговування. Порівнюючи ізохорну систему з гіпербаричною, технологія досить проста. На відміну від процедури гіпербаричного заморожування, ізохорна система не має рухомих компонентів, не потребує енергії для безперервної роботи і не має ризику закриття чи руйнування рухомих компонентів. Ізохорне заморожування – один із методів збереження, який привертає дедалі більшу увагу, оскільки має потенціал підтримувати якість зібраних овочів і фруктів без суттєвих змін їхніх фізико-хімічних та харчових характеристик.

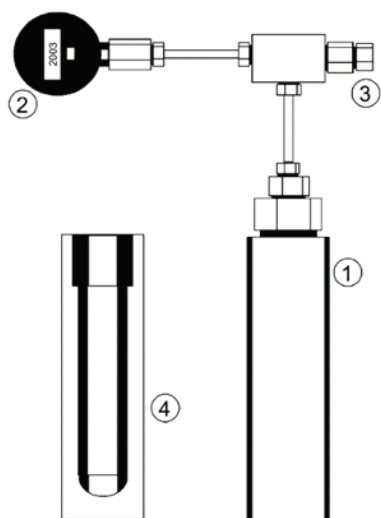
Мета заморожування подвійна: зменшити швидкість метаболізму до мінімуму, оскільки ферменти є білками, що залежать від температури, та зробити середовище непридатним для мікроорганізмів. Традиційне заморожування досягає цих цілей, але водночас знижує якість продуктів, споживання енергії є високим, а втрата ваги значна. Основою ізохорного заморожування є розгляд фізичного процесу [13-15]. З чисто термодинамічної точки зору, цю методику можна вважати закритою системою в якій об'єм залишається постійним. Закритою системою розуміють систему, яка не обмінюється масою з навколишнім середовищем, але може здійснювати тільки обмін енергією. Це замкнута система, тому що процес відбувається в герметичній камері. Оскільки всередині камери одночасно присутні дві фази: рідка, тобто вода та тверда, тобто лід, що пояснюється тим, що вода розширюється під час замерзання. Таким чином виникає тиск у системі з постійним об'ємом і утворення твердої фази ускладнюється.

Щоб зробити заморожування прийнятним для всіх видів сировини, максимізувати споживання енергії та зменшити вплив на довкілля, вивчаються альтернативи традиційним методам заморожування. Процеси, такі як ударне заморожування та гідрофлюїдизація, занурювальна морозильна камера з використанням льодового осаду, забезпечують вищі температури теплопередачі поверхні з підвищенням швидкості замерзання, що має потенціал суттєво покращити якість продуктів, таких як рибні філе та бургери [11, 13-15]. Методи використовують струмені повітря або охолоджуючої рідини, які рухаються з надзвичайно високими швидкостями для швидкого заморожування продукту. Існують інші передові методи, що допомагають генерувати менші кристали льоду – це заморожування під тиском та ультразвукове заморожування. Інші нещодавні досягнення в технологіях заморожування включають кріофіксацію, мікрохвильове заморожування та осмодегідроконгеляцію. Ще одним досягненням є технологія розумного заморожування, коли якість сировини відстежується по всьому холодовому ланцюгу шляхом інтеграції сенсорних технологій із механічними компонентами заморожування. Для прогнозування часу замерзання та якості продукції розумне заморожування використовує бездротові сенсорні мережі, комп'ютерний зір, діагностичні інструменти в

реальному часі, ультразвукове керування процесом заморожування, газові датчики для прогнозування розміру кристалів у морозиві або морозиві та датчики відстеження температури.

У харчовій промисловості заморожування під атмосферним тиском є основним методом продовження терміну зберігання харчового продукту. Взаємодії, що спричиняють погіршення, ускладнюються кристалізацією та низькою температурою води під час замерзання, що також зупиняє ріст патогенів і мікробів, що псують. Але коли матеріал заморожується, утворюється лід, що знижує якість розмороженої сировини і ускладнює прийнятність цих заморожених продуктів для споживачів. Сучасна технологія заморожування, відома як ізохорне заморожування, може значно покращити текстуру та смак заморожених продуктів.

Ізохорне заморожування – це новаторська техніка, яка підтримує продукти при температурі нижче замерзання без пошкодження через утворення кристалів льоду всередині продукту (рис. 1.4). Вона має відносно низькі енергетичні потреби. Продукти, консервовані за допомогою ізохорного заморожування, мають вищу якість, ніж ті, що зберігаються традиційним заморожуванням і загалом споживають менше енергії [6, 12]. Тиск, як вже було зазначено раніше, спричиняється утворенням льоду, який, контактуючи з твердими стінками камери, здатен створювати дуже високий гідростатичний тиск, що відбувається також завдяки відсутності повітря, яке є дуже стисливим. Таке збільшення тиску також спричинює зниження точки замерзання. Тому утворюється лід приблизно половини початкового об'єму, лід продовжує розширюватися до досягнення фактичної точки замерзання системи за певної температури. Завдяки цьому процесу продукти зберігаються у воді, а не в льоду, перебуваючи у двофазовому стані, що запобігає пошкодженню від заморожування, оскільки не лише продукт занурений у воду, а й він сам не заморожується. Ця роздільність між харчовим продуктом та льодом не відбувається при звичайному ізобаричному заморожуванні.



Ізохорна камера складається з камери з постійним об'ємом, яка є герметично закрита, де манометр використовується для контролю тиску. Ємність заповнюють рідиною та сировиною і охолоджують шляхом занурення в ванну з постійною температурою (1 – ємність, 2 – манометр, 3 – запобіжний диск, 4 – поперечний переріз ємності, яка знаходиться під тиском).

Рисунок 1.4 – Ізохорна камера

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ

Арк.

16

Для проведення ізохорного заморожування потрібна камера з постійним об'ємом, здатна витримувати високий тис. Зазвичай камера виготовлена з нержавіючої сталі та герметично закрита з манометром зверху. Він використовується для контролю внутрішнього тиску та запису даних. Усередині камери розміщується продукт, що заморожується, разом із водним розчином до заповнення. У водному розчині зазвичай розчиняють сіль, етиленгліколь або цукор. Вибір розчиненої речовини та її концентрація служать для підтримання осмотичної рівноваги з зразком. Камеру, яка ще відкрита, занурюють у ванну з постійною температурою, що слугує для зниження температури системи [6, 13-15]. Температуру зменшують до точки фазового переходу між рідиною та твердим станом. На цьому етапі в камеру додають матеріал розміром 3x3 мм, який служить для ініціювання кристалізації льоду та визначення його положення. Камеру потім герметично закривають і ще більше знижують температуру. Лід починає утворюватися в водному розчині, а збільшення об'єму льоду підвищує тиск у системі.

Метод заморожування базується на зменшенні фізичних ушкоджень, спричинених утворенням льоду всередині продукту. Насправді лід ніколи не утворюється всередині продукту, як пояснюється через фазову діаграму води. При ізохорному заморожуванні вода завжди перебуває у термодинамічній рівновазі з твердою фазою, тобто льодом. Відбувається перехід з рідкої фази у фазу рівноваги. Температура знижується, тиск зростає постійно, а кількість льоду збільшується відповідно до температури [13-15]. Вода розширюється при замерзанні. Оскільки об'єм є сталим через використання герметичного контейнера, лід не може розширюватися вільно, створюючи таким чином гідростатичний тиск, що діє на систему (рис. 1.5). Підвищення тиску знижує температуру замерзання розчину, і лід продовжує утворюватися до тих пір, поки температура замерзання не зрівняється з навколишньою температурою. Внаслідок цього дві фази – рідка і тверда співіснують при температурі нижче точки замерзання при атмосферному тиску. Харчова матриця розташовується у водній частині, що захищає її від шкідливого впливу заморожування, а водночас знижує метаболізм і збільшує термін зберігання.

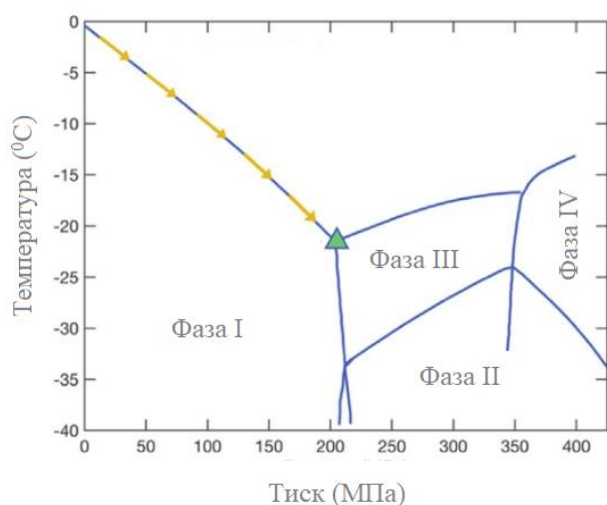


Рисунок 1.5 – Ізохорна крива

Під час реакції система проходить точно криву стану, що відокремлює рідку фазу від льоду до трійкової точки. Виділено фазову криву між рідиною: льодом 1 та льодом 3, якою буде слідувати ізохорна система до температур, що перевищують трійкову точку, що можна спостерігати також за допомогою растрової електронної мікроскопії.

Зображення, зроблені на вишнях, показують, що при -4°C клітини зберігали цілісність мембрани та клітинної стінки, а внутрішньоклітинний простір заповнився зовнішнім водним розчином, використаним для експерименту [6, 13-15]. При -7°C структура продукту, навпаки, відрізняється; є зони, де клітини залишаються цілими, тоді як інші демонструють скловидні утворення через втрату клітинної проникності. Ймовірно, цей феномен спричинений високим тиском системи, тобто 62 МПа, та різною стисливістю клітинної речовини. При заморожуванні при високому тиску існує лише одна фаза – рідка і тиск у системі підвищується без утворення льоду. Тиск підвищується за допомогою механічних пристроїв. Після високого тиску слідує швидке заморожування, що дозволяє зберегти структуру сировини. У ізохорному заморожуванні відбуваються дві співіснуючі фази: тверда та рідка. У ізохорній системі природним чином налаштовується на мінімальний тиск для обраної температури, мінімізуючи токсичний ефект тиску.

Заморожування – це спосіб довготривалого зберігання сировини, що краще зберігає зовнішній вигляд, смак і поживну цінність їжі, ніж інші методи. У замороженому стані хімічні реакції, мікробна активність і метаболізм клітин у їжі значно обмежені, щоб сировина не була схильна до руйнування. Попит на продукти харчування з мінімальною обробкою та без добавок стимулює подальше зростання заморожених продуктів. Однак доведено, що заморожування має певні негативні наслідки для якості сировини, включно з механічними пошкодженнями, концентрацією заморожування, опіком у морозильній камері, рекристалізацією тощо, що обмежує широке застосування цієї технології у збереженні харчових продуктів [16]. Щоб мінімізувати погіршення якості сировини, спричинене заморожуванням, використовуються деякі нові технології, такі як ультразвук, мікрохвильові та електромагнітні поля, які допомагають заморожувати сировину. Серед них електричні та магнітні поля привернули більше уваги завдяки високому якісному утриманню і, таким чином, мають потенціал у зменшенні пошкоджень сировини при заморожуванні.

Прикладені електричні та магнітні поля впливають на кристалізацію молекул води під час заморожування. Під дією зовнішнього магнітного поля додаткові насичені водневі зв'язки роблять ґраткову структуру молекул води більш впорядкованою та стабільною. Крім того, вважається, що магнітне поле підсилює теплові коливання, спричинені дією електронів, що запобігає утворенню ядра молекул води нижче замерзання і, відповідно, збільшує переохолодження [13-16]. Коли температура продовжує падати настільки, що коливання вільної води опускається нижче критичного рівня або коли прикладене магнітне поле відводиться так, що вплив електронних на теплові коливання взаємно компенсується, тепловий коливання, що перешкоджає утворенню вільної води, раптово знижується до певного рівня, відбувається миттєве нуклеювання, супроводжуване утворенням дрібних і однорідних кристалів льоду. Різні дослідження показали позитивний вплив магнітного поля з відповідними параметрами на заморожування сировини.

Заморожування за допомогою електричного поля є новою технологією,

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

яка набирає обертів серед методів електрозаморожування. Вона пропонує менш енергоємні умови заморожування (вища температура навколишнього середовища, нижча швидкість повітря) і дозволяє краще зберігати якість. Заморожування за допомогою електричного поля зазвичай поділяють на дві основні категорії: статичне електричне поле та змінне електричне поле. Заморожування за допомогою статичного електричного поля дозволяє індукувати нуклеацію при зниженому переохолодженні води. Застосування заморожування води з допомогою статичного електричного поля має сприятливий ефект на утворення ядер, індукуючи нуклеацію при відносно високих температурах [17]. Під впливом зовнішнього вирівнювання диполів молекул води змінюється від їхнього природного випадкового напрямку до напрямку вектору електричного поля. Це переналаштування диполів молекул води зміцнює водневий зв'язок між молекулами води у напрямку електричного поля. Внаслідок цього структура водних кластерів може змінюватися в порядкуванні, що, у свою чергу, може сприяти процесу нуклеації. Застосування електричного поля під час заморожування сприяє утворенню численних дрібних кристалів льоду в заморожених матрицях, мінімізуючи порушення клітин, зменшуючи втрати крапель, зменшуючи денатурацію білка та зберігаючи текстуру свіжої сировини після розморожування.

Використання коливного електричного поля у процесі заморожування з метою збереження кращої якості сировини є дуже новою та перспективною технологією. Механізм дії ще не повністю зрозумілий, але різні дослідники запропонували кілька гіпотез [15, 17]. Одна з таких гіпотез полягає в тому, що коливне електричне поле створюється у внутрішньому просторі морозильної камери, що збуджує молекули води та йони води, що містяться в матеріалі, розміщеному у внутрішньому просторі, тим самим матеріал переохолоджується понад нормальну температуру замерзання, пригнічуючи заморожування води і після припинення генерації або колювання магнітного чи електричного поля матеріал миттєво замерзає при низькій температурі. Інша гіпотеза стверджує, що крутячий момент, індукований коливним електричним полем може збільшити число ізомерних конфігурацій та відхилити молекули води від рівноважного стану в кластері, зменшуючи ймовірність формування кластера молекул, який добре підходить для інтеграції у кристалічну решітку. В результаті швидкість росту кристалів значно знижується.

Технології на основі ультразвуку набирають популярності у різних харчових застосуваннях або замінюючи традиційні технології, або допомагаючи традиційним технологіям підвищувати їхню ефективність. Ультразвукова обробка застосовувалася для підвищення ефективності різних технологій харчової обробки, а саме заморожування, розморожування, екстракції, окислення, фільтрація та сушіння. Індукована кавітація в незамороженій рідкій фазі є одним із найважливіших явищ, викликаних дією акустичної енергії. Кавітація також допомагає ініціювати утворення нуклеації льоду та збільшує швидкість нуклеації, оскільки газові бульбашки можуть діяти як нуклеативні агенти [13, 17]. Фрагментація кристалів – ще одне значне акустичне явище, яке може призвести до зменшення розміру кристалів.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Важливий аспект для кращого заморожування для підтримки якості сировини. Заморожування з допомогою ультразвуку може використовуватися для індукції нуклеації та контролю розподілу розміру кристалів у заморожених продуктах під час заморожування рідинної сировини. Якщо його застосовувати до процесу заморожування свіжих продуктів, це не лише підвищує швидкість заморожування, а й покращує якість заморожених продуктів. Застосування потужного ультразвуку також може допомогти зменшити інкрустацію на замерзаній поверхні. Здатність потужного ультразвуку виконувати ці функції залежить від широкого спектра параметрів, таких як тривалість, інтенсивність або частота ультразвукових хвиль.

На основі вище зазначеного можна вважати, що заморожування – це широко використовуваний метод збереження сировини, який зберігає її поживну якість, сенсорні особливості та текстурні властивості. Хоча заморожування використовується для збереження харчового матеріалу протягом кількох десятиліть, воно не підходить для всіх продуктів, і заморожування може спричинити фізичні та хімічні зміни в деяких продуктах, які сприймаються як такі, що знижує якість як розмороженого матеріалу, так і кінцевого продукту.

Зазначено, що заморожування – це термодинамічний процес під час якого речовина переходить із рідкого стану в твердий через зниження температури нижче точки замерзання. Під час замерзання молекули або атоми речовини сповільнюють свою кінетичну енергію, зближуючись один з одним і утворюючи регулярну тверду структуру. У процесі цього температура залишається стабільною, поки весь матеріал не застигає, після чого температура починає додатково знижуватися. Процес заморожування складається з чотирьох етапів: передзаморожування, перенасичення, етап заморожування та етап глибокого заморожування. На першому етапі тепло видаляється з продукту до досягнення точки замерзання. На другому етапі температура опускається нижче значення замерзання. Під час третього етапу видаляється приховане тепло і вода перетворюється на лід. На останньому етапі температура об'єкта знижується до температури зберігання.

Зазначено, що тунельна машина швидкого заморожування – це високоефективний пристрій для заморожування, розроблений для промислової обробки харчових продуктів. Його тунельна структура дозволяє сировини безперервно проходити через низькотемпературне середовище на виробничій лінії, досягаючи рівномірного замерзання. Він широко використовується для виробництва м'яса, морепродуктів, фруктів, овочів та готових до вживання страв. Тунельна машина швидкого заморожування працює переважно завдяки високошвидкісній циркуляції повітря та низькотемпературній системі охолодження. Існують також передові методи, що допомагають генерувати менші кристали льоду – це заморожування під тиском та ультразвукове заморожування. Ізохорне заморожування – це новаторська техніка, яка підтримує продукти при температурі нижче замерзання без пошкодження через утворення кристалів льоду всередині продукту. Вона має відносно низькі енергетичні потреби, бо відбувається під тиском.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

РОЗДІЛ 2

ОПТИМІЗАЦІЯ СТАТИЧНОГО ТУНЕЛЮ ДЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

2.1 Вибір обладнання для холодильної системи

Процес заморожування складається з трьох ключових етапів: попереднє охолодження, фазовий перехід і заморожування. Під час етапу попереднього охолодження А і В з продукту видаляється розумне тепло, щоб знизити його температуру. Після досягнення точки замерзання фазовий перехід зазвичай не запускається одразу, але охолодження триває. Наприкінці етапу попереднього охолодження продукт залишається в незамороженому (переохолодженому стані) нижче точки замерзання протягом певного часу. При певному ступені переохолодження раптово відбувається зародження льоду, що призводить до швидкого підвищення температури продукту через виділення прихованого тепла [3, 17]. Після етапу нуклеації льоду слідує фазовий перехід, також відомий як плато замерзання і під час цього етапу температура продукту залишається майже сталою, тоді як приховане тепло кристалізації видаляється, і в продукті ростуть кристали льоду. Більший ступінь переохолодження (різниця між температурами замерзання та нуклеації) призводить до миттєвого утворення більшої кількості нуклеації льоду і, відповідно, коротший час фазового переходу. Після того, як більшість води замерзла в лід, під час етапу загартування видаляється розумне тепло під час охолодження продукту при температурі морозильника.

Кінцева форма, розмір і розподіл кристалів льоду, що утворюються в продукті, залежать від швидкості нуклеації льоду та подальшого росту кристалів. Вищі темпи зародження льоду та подальший ріст кристалів сприяють утворенню менших, кругліших і більш однорідно розподілених кристалів льоду. Одним із ключових факторів, що контролюють нуклеацію льоду, є переохолодження. Кожен ступінь переохолодження збільшує швидкість зародження льоду приблизно в 10 разів. У чистій воді для однорідного зародження потрібне дуже велике переохолодження. Хоча для початку нуклеації в сировині потрібне переохолодження, воно зазвичай значно нижче через наявність численних твердих частинок, розчинених речовин і поверхонь, які діють як нуклеативні агенти [1-3, 17]. Крім того, важливо зазначити, що при заморожуванні продуктів зазвичай встановлюються великі теплові градієнти між зовнішньою стороною та центром продукту. Коли це відбувається, переохолодження та нуклеація відбуваються лише на поверхні продукту, що контактує з холодоагентом. Підвищення температури, спричинене кристалізацією льоду, зазвичай перешкоджає будь-якому

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Іванов			Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів			Літ.	Арк.	Аркуші		
Перевір.		Гончаренко								21	18	
								ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Омельченко										

подальшому нуклеації в центрі продукту. Ріст кристалів відбувається лише після нуклеації шляхом додавання молекул води до вже сформованих ядер, і його швидкість головним чином залежить від ефективності прихованого видалення тепла.

Щоб застосувати заморожування до продукту, необхідна холодильна машина, яка є пристроєм, призначеним для видалення тепла з простору або матеріалу та передачі його в інше місце, створюючи середовище з нижчою температурою. Цей процес можливий завдяки термодинамічному циклу, відомому як «холодильний цикл». Нижче наведено базовий опис холодильного агрегату. Компресор є серцем холодильного агрегату. Його функція полягає в тому, щоб стискати холодоагент, збільшуючи його тиск і температуру. Стиснений газ під високим тиском потім подається до конденсатора, де він віддає тепло навколишньому середовищу або охолоджуючій рідині (такій як повітря чи вода) [6]. Газ конденсується і переходить у рідкий стан через виділення тепла. Рідину під високим тиском потім пропускають через розширювальний клапан, де тиск раптово знижується, що викликає розширення рідини, через що вона випаровується і різко знижується її температура.

Рідина холодоагенту при низькому тиску та температурі надходить у випарник, розташований всередині зони або системи, яку потрібно охолодити. Під час цього процесу рідина поглинає тепло з навколишнього середовища і знову перетворюється на газ. Газоподібний холодоагент потім знову всмоктується компресором, і цикл повторюється. Процес повторюється постійно, щоб підтримувати температуру камери і/або матеріалу нижчою за температуру навколишнього середовища. Холодильна машина використовує газ-холодоагент, який циклічно стискається і розширюється. Під час стиснення газ поглинає тепло від конденсатора, а під час розширення газ віддає тепло випарнику. Цей цикл дозволяє системі постійно видаляти тепло з певної зони і підтримувати її при бажаній нижчій температурі.

Системи адсорбції за своєю природою потребують великих поверхонь теплообміну для передачі тепла до і від адсорбентів, що автоматично призводить до проблем з витратами. Системи з високою ефективністю вимагають, щоб тепло адсорбції було відновлене для забезпечення частини тепла, необхідного для регенерації адсорбенту. Ці регенераційні цикли, отже, потребують кількох теплообмінників з двома шарами та складних схем передачі тепла і систем контролю для відновлення і використання залишкового тепла, що виникає при переході теплообмінників від адсорбції до десорбції холодоагенту. Так само важливі, як і обладнання для холодильного циклу, це охолоджувальна рідина, яка є речовиною, що діє як агент охолодження, поглинаючи тепло від іншого тіла або речовини.

1. Компресори – це елементи, які відповідають за підвищення тиску холодоагенту в системі охолодження до відповідного рівня, щоб він міг потрапити в конденсатор. Існують різні типи компресорів, які обираються відповідно до розміру та характеру установки, а також типу холодоагенту, що використовується [4, 19]:

– об'ємні компресори – підвищення тиску відбувається за рахунок

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення об'єму;

– компресори з позитивним зміщенням (поршневі) складаються з поршнів, які рухаються за допомогою штифтів і шатунів від коленвала. Крім того, вони використовуються в установках середньої та великої потужності. Вони відносно дешевші за гвинтові компресори (на 50%), але потребують частого технічного обслуговування. Мають ступінь стиску 9:1 (багатопоршневі). На ринку вони представлені у вигляді: відкритих, напівгерметичних та герметичних;

– ротаційні гвинтові – це гвинтові шестерні, які можуть бути простими або подвійними. Вони працюють з найбільш поширеними холодоагентами та підходять для будь-якого застосування. Мають ступінь стиснення 19:1, компактні та малої ваги. Великі компресори цього типу – це компресори з гвинтовою передачею або з лопатками, вони мають ступінь стиснення 7:1;

– динамічні компресори (турбокомпресори) – це компресори, де стискання відбувається за рахунок дії відцентрової сили і вони застосовуються при потужності понад 200 тон холодопостачання. Зазвичай вони досягають швидкостей від 1800 до 90000 об/хв та можуть працювати при температурі до всмоктування при -100°C . Його робота є безперервною протягом тривалих періодів часу.

2. Конденсатори – це обладнання, яке відповідає за охолодження холодоагенту, переходячи з газоподібного стану в рідкий, передаючи енергію зовнішньому середовищу або іншому засобу, який її поглинає [26-27]:

– охолоджені водою – це пристрої, які використовують воду як засіб охолодження. Вони складаються головним чином з корпусу та труб, які можуть бути горизонтальними або вертикальними. Вони більш ефективні, ніж повітряні конденсатори, і можуть досягати нижчих температур конденсації, але потрібне використання води, що підвищує витрати на експлуатацію системи;

– повітряне охолодження – це установки, які використовують повітря для конденсації холодоагенту і можуть працювати за принципом вільної або примусової конвекції. У тих, що працюють на вільній конвекції, труби голі, натомість у тих, що працюють на примусовій конвекції, труби з ребрами. Використовуються при середніх і низьких навантаженнях, мають переваги, коли вода недоступна;

– випарні використовують як воду так і повітря як засіб конденсації, можуть бути з примусовим або індукованим потоком. Вони є більш економічними, ніж охолоджувані за допомогою води, хоча все одно потребують цієї рідини.

3. Розширювальний пристрій – це елемент, який знижує тиск на виході з конденсатора, знижуючи його температуру до досягнення необхідного холодильного ефекту для процесу [4]:

– автоматичний розширювальний клапан – це пристрої, які підтримують постійний тиск у залитих випарниках, подаючи більший або менший потік у випарник залежно від теплового навантаження;

– термостатичний розширювальний клапан – пристрій, який дозволяє регулювати масовий потік холодоагенту залежно від теплового навантаження,

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оскільки має термосенсорну капсулу, яка підключається до виходу випарника. Пристрій, який використовується у випарниках сухого або прямого розширення.

4. Випарники – це обладнання, яке відповідає за поглинання тепла від теплового навантаження. Проходить через перетворення холодоагенту з рідко-парової суміші в пару. Вони обираються залежно від теплового навантаження. Існують різні типи випарників, які можна класифікувати по-різному [4, 20-21]:

За способом подачі холодоагенту:

– з прямим розширенням або сухе розширення – це ті, у яких випаровування холодоагенту відбувається під час його проходження через це обладнання, отримуючи перегріту пару на виході. Вони є найпоширенішими, але не найкращими для установок великого об'єму, менш ефективні, ніж затоплені випарники, але їхній дизайн простіший і вимагає меншої кількості холодоагенту; крім того, вони мають менше проблем з відділенням масла в системі;

– занурені – це установки працюють із рідким холодоагентом всередині теплообмінника, що зволожує всю його внутрішню поверхню, забезпечуючи кращий теплообмін. Крім того, ці установки оснащені акумулятором або паровим колектором, який одночасно слугує приймачем рідини. Вони використовуються у великих об'єктах і працюють за низьких температур.

Охолодження повітря – ці пристрої можуть мати первинну поверхню (відкриті труби та пластини) або вторинну поверхню (з додатковими ребрами). Крім того, спосіб розподілу повітря між ними може бути природним або примусовим.

– голі або оголені труби – це найпростіші типи, які зазвичай виготовляються зі сталевих або мідних труб. Сталеві труби використовуються для великих випарників і тих, що працюють з аміаком; а мідь для найменших та інших холодоагентів;

– поверхневі пластини – це обладнання різного типу, деякі складаються з двох металевих пластин, тиснених і зварених разом так, щоб холодоагент міг проходити між пластинами (пластинообмінник);

– ребрані випарники – це котушки з відкритими трубами, на які розміщуються металеві пластини або ребра, що слугують вторинною поверхнею, збільшуючи зовнішню площу обмінника. Вони найчастіше використовуються в промислових холодильних установках. Розмір і відстань між ребрами залежать від типу застосування, останній варіюється від 1 до 14 ребр на дюйм, ця варіація залежить від робочої температури котушки; чим нижча температура, тим більша відстань між ребрами, цей параметр є фундаментальним для утворення інею у випарнику.

Система охолодження, крім наявності основних компонентів, потребує також елементів або пристроїв, які забезпечують правильну роботу, контрольовану експлуатацію та періоди обслуговування під час зупинок машини або у разі необхідності [4]:

– масловіддільник встановлюється на випускному трубопроводі для відділення масла від холодоагенту та повернення його в картер компресора. Усі

поршневі та ротаційні компресори простого дії пропускають невелику кількість масла у випускну трубу, яку потрібно повернути в картер;

- глушник встановлюється на виході з компресора, щоб уникнути шуму та вібрацій при викиді;

- резервуар для охолоджуючої рідини – це бак, який зберігає надлишок охолоджуючої рідини, що циркулює по системі;

- осушувальний фільтр розташований у трубі для рідини, після конденсатора, його функція – захищати термостатичний клапан та видаляти всі сторонні тіла з охолоджуючої рідини, такі як виробничі домішки, волога та кислоти;

- теплообмінник використовується для підохолодження рідини-охолоджувача, що виходить із конденсатора, але при цьому нагріває пару на виході з випарника. Це обладнання не змінює ефективність циклу, лише допомагає зменшити навантаження охолоджуючої рідини в циклі. У цьому випадку воно не буде потрібне.

Пристрій контролю відповідає за правильну роботу системи [4]:

- регулювальний клапан тиску можна використовувати на виході з випарника, щоб забезпечити підтримання постійного тиску і забезпечити умови насиченої пари, зазвичай його застосовують, коли один компресор обслуговує кілька випарників. Крім того, він також встановлений на вході в компресор, «регулятор тиску в картері», щоб запобігти можливим перевантаженням під час запуску, після тривалих періодів зупинки або після періодів відтаювання з підвищеним тиском у випарнику. Для цього встановлюють контрольний тиск, при досягненні якого клапан закривається через занадто високий тиск. Варто зазначити що цей пристрій регулює тиск на виході з клапана, тому на нього не впливає змінний тиск на вході;

- соленоїдний клапан – це клапан, зазвичай відкритий або закритий, його можна використовувати, щоб уникнути заповнення випарника холодоагентом, коли машина зупинена;

- датчик температури або термостат – контролюють конкретні точки системи, відкриваючи або закриваючи контакти залежно від заданого значення. Крім того, слід мати на увазі, що буде передбачена система керування для правильного функціонування машини.

Холодильна машина складатиметься з електромеханічних або електронних контролерів, які дозволяють контролювати процес заморожування таким чином, щоб можна було регулювати параметри процесу, такі як: тиск, температура, витрата або рівень, у разі потреби. Електрична система необхідна, щоб система охолодження могла працювати правильно, необхідно, щоб електричні пристрої або обладнання (компресор, конденсатор і випарник) отримували електропостачання належним чином. З цієї причини важливим є проєктування електричного кола, яке складається з пристроїв, що забезпечують передачу електроенергії та контролюють правильну роботу системи. В основному елементи керування та захисту використовуються як засіб захисту електричної системи. Можна виділити наступні [4]:

- контактор – це вимикач, який служить засобом автоматичного

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

керування та захисту електричної системи;

– теплове реле – це засіб автоматичного захисту від короткого замикання, що може виникнути в електричній системі;

– термомагнітний вимикач – це елемент обмеження струму, який використовується для захисту електричної установки у випадках перевантаження.

2.2 Енергетичний аналіз та вибір системи охолодження

Обраний у проектуванні метод заморожування – це статичний тунель заморожування, який ґрунтується на заморожуванні продукту за допомогою примусового повітря. Тип обладнання має велику гнучкість, підлаштовуючись під потужність обробки, розміри та форму продукту. Заморожування повітрям здійснюється на обладнанні, спеціально розробленому для цієї мети, наприклад, у тунелях заморожування або конвеєрних морозильниках [18]. В обладнанні холодне повітря циркулює через продукти, розміщені на лотках, які поміщаються на візки, що рухаються у приміщенні, над якими знаходиться випарник. Вентилятор, приєднаний до випарника, направляє потік повітря до візків, а інший вентилятор на протилежному кінці всмоктує повітря, що пройшло через візки, утворюючи замкнений контур, температура в якому поступово знижується до заданої.

Конвекція є ключовим механізмом теплопередачі через рідину, за умови, що існує значний рух рідини. Конвекція може бути двох типів: природною або примусовою, все залежить від того, як викликається рух рідини. У випадку примусової конвекції потік рідини створюється над поверхнею або в трубі за допомогою зовнішніх засобів, таких як насоси або вентилятори [23]. Щодо природної конвекції, будь-який рух рідини спричиняється природними факторами, такими як ефект плавучості, що призводить до підняття теплої рідини і опускання холодної. Додатково, конвекція може бути зовнішньою або внутрішньою, залежно від того чи спрямовується рідина до переміщення по поверхні чи через трубу. Складність теплопередачі шляхом конвекції полягає у її подвійній природі: вона включає як рух рідини так і теплопровідність. Динамічна рідина посилює теплопередачу, полегшуючи контакт між теплішими та холоднішими зонами рідини. Цей контакт активує збільшення коефіцієнтів теплопровідності у більшій кількості точок. Внаслідок цього швидкість теплопередачі через рідину за рахунок конвекції значно перевищує теплопровідність. Чим більша швидкість рідини, тим вища швидкість теплопередачі. При взаємодії твердого тіла та рідини за різної температури відбувається теплообмін конвекцією. Концепції рішення тунелю наведені в таблиці 2.1.

Обрано варіант з примусовою вентиляцією (статичний тунель заморожування), де упакований продукт розміщується на лотках, які за допомогою транспортних візків потрапляють у морозильну камеру і утримуються там у статичному положенні до досягнення бажаної температури заморожування. В промисловому тунелі швидкого заморожування, коли тунель

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заповнюється і тоді починається процес заморожування. Час перебування партії в тунелі визначається логістикою навколо тунелю. Зазвичай кожна партія заморожується протягом 22, 34 або 46 годин, при цьому враховується дві години на спорожнення та заповнення тунелю.

Таблиця 2.1 – Можливі концептуальні рішення тунелю

Варіанти обладнання	Характеристика
Примусова вентиляція (статичний тунель заморожування)	Упакований продукт розміщується на лотках, які за допомогою транспортних візків потрапляють у морозильну камеру і утримуються там у статичному положенні до досягнення бажаної температури заморожування.
Примусова вентиляція (лінійний конвеєр)	Продукт потрапляє в морозильну камеру і переміщується вздовж лінійної стрічки, досягаючи заморожування після завершення свого проходження.
Випаровування рідкого азоту	Продукт потрапляє в морозильну камеру окремо, без упаковки і заморожується через контакт з рідким азотом, який має температуру -196°C .
Примусова вентиляція (спіральна конвеєрна стрічка)	Продукт потрапляє через верхню частину і виходить замороженим з нижньої частини машини.
Примусова вентиляція (статичний тунель заморожування)	Продукт потрапляє в статичну морозильну камеру, упакований у лотки та перенесений на піддонах всередину.

Зазвичай вентилятори працюють на постійній швидкості протягом усього процесу заморожування. Кожен тунель споживає 20 кВт для роботи вентиляторів. Енергія перетворюється на тепло, яке поглинається повітрям і повинно видалятися холодильним агрегатом через випарник. Система охолодження, яка використовується в цьому обладнанні має на меті охолоджувати певний простір, тобто відводити тепло. Найпоширенішими є ті, що базуються на випаровуванні конденсованих рідин, які відновлюються шляхом абсорбції або стиснення, причому остання має вищу ефективність [22]. Система зі стисненням полягає у безперервній циркуляції охолоджувальної рідини через випарник, компресор, конденсатор та регулювальний клапан у замкненій системі, створюючи зони високого та низького тиску з метою того, щоб рідина поглинала тепло в одному місці і віддавала його в іншому. Компресор вважається справжнім двигуном всієї холодильної установки, тоді як конденсатор, по суті, є теплообмінником, який відводить увесь тепловий потік з системи охолодження, включаючи не лише тепло, поглинуте випарником, але й енергію, передану компресором.

Необхідно здійснити енергетичний розрахунок для вибору обладнання для заморожування, що включає розрахунок теплового навантаження під час заморожування фруктової сировини та додаткових навантажень, що виникають під час його заморожування. Енергетичне навантаження використовується для визначення необхідної охолоджувальної потужності у тунелі, що підлягає вибору. Для вибору обладнання проводиться енергетичний розрахунок, щоб визначити необхідне холодопродуктивність для заморожування відповідно до потрібної потужності.

1. Теплова система. Для визначення теплового навантаження обладнання необхідно визначити [10]:

- теплове навантаження продукту: заморожування продукту від початкової температури 20°C до бажаної температури -18°C;
- теплове навантаження через упакований матеріал або контейнер: вважається необхідним зменшити температуру піддону на якому знаходяться фруктова сировини;
- теплове навантаження від електричного обладнання в тунелі: визначається теплом, яке виробляє електричне обладнання, що знаходиться всередині тунелю, як-от освітлення та двигуни;
- навантаження через ізоляцію: через стіни тунелю відносно обробної ділянки;
- навантаження через зміни повітря або витоки, що виникають у отворах, де входить і виходить продукт.

Теплова система включає розрахунки, необхідні для визначення теплового навантаження, вибору холодоагенту та необхідного обладнання, щоб система могла працювати належним чином. При виборі обладнання буде детально описано отримання основних компонентів (конденсуючий блок, випарник та розширювальний вентиль) та додаткове обладнання. Коли продукт охолоджується нижче початкової точки замерзання, починається процес заморожування, який не відбувається при постійній температурі, а заморожується в діапазоні температур, що не обов'язково починається з нуля, а залежно від концентрації цукрів може відбуватися при нижчій температурі. У випадку фруктів це відбувається при -0,6°C, що є емпіричним значенням. Доля льоду – це частка води, яка фактично замерзає при певній температурі. Щільність продукту залежить від пористості продукту, яка в нашому випадку дорівнює нулю, а також від щільності та масової частки складових продукту. Питома теплоємність – це міра енергії, необхідної для зміни температури продукту на один градус [4, 11]. Властивість не є сталою і змінюється залежно від температури. З іншого боку, щоб отримати питому теплоємність продукту, потрібно враховувати, чи він знаходиться нижче чи вище точки початку заморожування. Ентальпія – це кількість енергії, яка міститься в харчовому продукті при певній температурі і яку потребує система відліку. У випадку, якщо харчовий продукт знаходиться вище точки замерзання, ентальпія складається з корисної енергії, а нижче цієї точки вона являє собою комбінацію корисної та латентної енергії.

Теплопровідність пов'язана з передачею тепла шляхом кондукції

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

внаслідок градієнта температури. У випадку харчових продуктів це значення залежить від складу продукту, його структури та температури. Існують різні емпіричні та теоретичні моделі для моделювання теплопровідності, які поділяються на дві великі групи: теплопровідність, що відбувається паралельно або перпендикулярно до продукту. Як правило теплопровідність відбувається паралельно до продукту, оскільки це більше відповідає процесу, адже потік тепла паралельний до сировини. Теплове навантаження, також відоме як охолоджувальне навантаження – значення в одиницях енергії, необхідне для охолодження або заморожування продукту від початкової температури до потрібної температури. Будуть проведені необхідні розрахунки для визначення теплового навантаження на заморожування, що є основною змінною для вибору компонентів системи. Компоненти, які враховуються для визначення необхідного теплового навантаження в системі заморожування [4, 11]:

- теплове навантаження через передачу – потік тепла через стіни охолоджуваного приміщення;
- теплове навантаження продукту – потік тепла, що виникає в процесі охолодження та заморожування продукту;
- внутрішнє навантаження – потік тепла, необхідний для охолодження матеріалів для транспортування та пакування продукту;
- інфільтраційне навантаження – потік тепла, пов’язаний із проникненням повітря у машину.
- навантаження, пов’язане з обладнанням – це потік тепла, пов’язаний з роботою холодильного обладнання, наприклад, двигунів вентиляторів випарників, тепла, що виділяється під час розморожування випарника, коли він працює при температурах нижче точки замерзання.

Перші чотири компоненти навантаження складають основне теплове навантаження і є базою для проектування морозильної машини. Для вибору обладнання як загальне навантаження враховують основне теплове навантаження плюс теплове навантаження, що походить від холодильного обладнання.

Теплове навантаження продукту. У холодильних установках з використанням повітря, таких як тунелі заморожування, швидкість повітря є дуже нерівномірною і в деяких зонах не перевищує 0,1–0,2 м/с, залежно від ступеня насичення тунелю продуктом та його розподілу. Для заморожування швидкість циркуляції повітря не повинна перевищувати 5 м/с [18]. Теплове навантаження – це холодильна здатність з якою працює тунель для заморожування продукту, і для його визначення використовується система розрахунків, яка передбачає обчислення всіх навантажень, що генерують або надають тепло в місці заморожування, тобто теплових або холодильних потужностей для підтримання холодної камери та всього, що знаходиться всередині неї.

Відтоді, як почалося використання холоду як методи збереження, технологічний процес, машини, обладнання та якість продукції на заморожувальних підприємствах покращилися з метою відповідності вимогам ринку та навколишнього середовища [10, 18]. Однак у деяких випадках

установки для заморожування не відповідають параметрам, закладеним у проєктах, таким як теплове навантаження, рівномірність швидкості повітря, розподіл температури або час заморожування, що безпосередньо впливає на сенсорні характеристики продукції під час процесу заморожування та відповідно на виробничі витрати. Для розрахунку теплового навантаження продукту враховуються 3 етапи процесу заморожування та фізичні властивості сировини. Перший етап передбачає вилучення чуттєвого тепла для зниження температури з 20°C до температура замерзання 0,7°C

$$Q_1 = m \cdot C_{p1} \cdot \frac{(T_1 - T_c)}{t}$$

де m – маса продукту;

C_{p1} – середня питома теплоємність вище температури його замерзання;

T_1 – початкова температура продукту;

T_c – температура замерзання продукту;

t – бажаний час охолодження.

$$Q_1 = 750 \frac{kg}{h} \times 3350 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot \frac{(20^\circ - 0.7^\circ)}{3600 s} \times 1h$$

$$Q_1 = 13,469.79 W$$

$$Q_1 = 13.47 kW$$

На другому етапі враховується теплота переходу для заморожування продукту до температури 0,7°C. Необхідна теплота для здійснення фазового переходу [10]

$$Q_c = m \cdot L$$

де m – маса сировини;

L – питома теплота плавлення сировини.

$$Q_c = 750 \frac{kg}{h} \times 250,680 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_c = 52,23 kW$$

Третій етап, чутливе тепло заморожування для досягнення бажаної температури -18°C [10]

$$Q_2 = m \cdot C_{p2} \cdot \frac{(T_c - T_2)}{t}$$

де m – маса продукту;

C_{p2} – середня питома теплоємність нижче температури його замерзання;

T_2 – кінцева температура продукту;

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

T_c – температура замерзання продукту;

t – бажаний час охолодження.

$$Q_2 = 750 \frac{kg}{h} \times 1775.65 \frac{J}{kg \cdot K} \times (0.7^\circ - (-18^\circ)) \times \frac{1h}{3600s}$$

$$Q_2 = 6.92 kW$$

Проблеми теплообміну класифікують на два типи: проблеми у яких жодна з залучених змінних не залежить від часу, відомі як стаціонарні, і проблеми нестійкого стану або ті в яких час відіграє важливу роль. Температура системи (наприклад, продукту харчування) змінюється лише залежно від місця під час роботи в стаціонарному стані. Внаслідок цього температура в конкретній зоні не змінюється з часом. Це є стан рівноваги системи [11]. Проблема теплообміну – це процес у нестабільному стані у якому температура всередині системи (у цьому випадку продукту) коливається з часом та простором (на поверхні, у центрі або на будь-якій відстані всередині продукту). Поширеним викликом у нестабільному стані є заморожування продукту до досягнення центром бажаної температури для зберігання, тоді як заморожування продукту для його зберігання є процесом у стаціонарному стані.

Тепло видаляється з речовини під час процесу охолодження або зниження температури через теплопровідність всередині сировини, а також на її поверхні за рахунок конвекції, випромінювання та випаровування. Ці чотири форми перенесення тепла відбуваються одночасно, хоча й у різному ступені. Оскільки випромінювання та випаровування сприяють передачі тепла значно менше, ніж інші способи, їх часто вважають неістотними і зазвичай не беруть до уваги при проведенні розрахунків. З цієї причини при аналізі будуть аналізуватися лише основні способи передачі тепла, а саме передача тепла шляхом теплопровідності та конвекції.

Внутрішній теплообмін для заморожених продуктів або теплопровідність залежить від стану заморожування, тобто від попереднього охолодження, заморожування та переохолодження. На фазі заморожування умови ускладнюються за рахунок рухомого фронту заморожування. Оскільки конвективна теплова передача та теплопровідність знаходяться послідовно і рівні, температура поверхні продукту відповідно регулюється [18, 22]. Теплопередача – загальне теплове навантаження або фактична експлуатаційна здатність тунелю для заморожування. Загальне теплове навантаження було результатом суми теплових навантажень, пов'язаних з сировиною та навантажень, пов'язаних із процесом заморожування. Загальне теплове навантаження продукту є сумою трьох отриманих значень теплоти

$$Q = Q_1 + Q_c + Q_2$$

$$Q = 13.47 + 52.23 + 6.92 kW$$

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$Q = 72.62 \text{ kW}$$

Теплове навантаження за пакувальним матеріалом. Вважається, що відчутне тепло, яке слід видалити, обчислюється для матеріалу, що використовується для пакування, або для врахування піддона, який входить до складу сировини, від температури процесу 20°C до зниження температури до -18°C [10]

$$Q = N \cdot m \cdot C_p \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{t}$$

де N – кількість лотків;

m – маса лопатка;

C_p – середня питома теплоємність;

T₁ – початкова температура;

T₂ – кінцева температура;

t – бажаний час охолодження.

$$Q = 13636 \times 0,005 \text{ Kg} \times 2720 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times \frac{(20 - (-18))}{1}$$

$$Q = 1.96 \text{ kW}$$

Швидкість заморожування в тунелі залежить від двох факторів. Наскільки швидко повітря проходить повз поверхню коробок і від температури повітря. Швидкість повітря навколо коробок визначає коефіцієнт теплопередачі, який контролює конвективну теплопередачу від поверхні. Температура повітря та температура поверхні продукту контролюють відведення тепла з продукту. Холодильне навантаження та швидкість заморожування, яка корелює з часом заморожування, є двома важливими характеристиками, оскільки їх знання під час вибору холодильного обладнання для конкретного типу продукту є критичним аспектом [11, 22]. Холодильне навантаження – це кількість теплової енергії, яку необхідно видалити з області зберігання продуктів харчування чи заморожених продуктів, відома як холодильне навантаження, також відоме як потреба в холодильному навантаженні. Тому швидкість видалення тепла з продукту, тобто кількість теплової енергії, видаленої з продукту за одиницю часу, становить більшу частину потреби в холодильному навантаженні, і що інші холодильні навантаження, такі як ті, що виникають від освітлення, обладнання та людей у охолоджуваному просторі, можна знехтувати.

Швидкість заморожування продукту пов'язана з часом заморожування є іншим важливим фактором у проєктуванні. Ритм зміни температури під час процесу заморожування по суті і є швидкістю заморожування. Обсяг заморожених продуктів, швидкість їх заморожування та й обладнання залежать від швидкості заморожування [11, 22]. Оскільки основні фактори, які визначають, чи є збереження продукту належним, а саме кількість води, що

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

перетворюється на лід, і розмір кристалів льоду, залежать виключно від швидкості охолодження. Повільніше заморожування призводить до утворення більшої кількості замороженої води та більших кристалів льоду, що може негативно вплинути на якість продукту, наприклад, робити овочі м'якшими, з'являється піщана текстура в морозиві та рвана м'язова структура у м'ясі та рибі. Швидше заморожування утворює більше дрібних кристалів льоду, що забезпечує продукти вищої якості.

Час заморожування є найважливішою інформацією, яка потрібна для вибору та побудови процесу заморожування. Швидкість впливає (або тривалість) заморожування на якість, стабільність та безпеку продукту, на вимоги до обробки та на економічні фактори. Час заморожування – це кількість часу, необхідного для охолодження продукту від його початкової температури до попередньо визначеної кінцевої температури в тепловому центрі, де охолодження відбувається найповільніше. Час заморожування оцінює час перебування продукту в тунелі охолодження та допомагає визначити продуктивність процесу. Під час аналізу як характеристик потоку повітря, так і змін температури харчових продуктів у тунелі швидкого заморожування необхідно враховувати широкий спектр факторів – від властивостей продукту, який підлягає заморожуванню, до параметрів, що характеризують внутрішній простір камери [11]:

- початкова температура продукту ($^{\circ}\text{C}$);
- кінцева температура продукту ($^{\circ}\text{C}$);
- питома теплоємність свіжого продукту (Дж/кг K);
- питома теплоємність замороженого продукту (Дж/кг K);
- щільність свіжого продукту (кг/м^3);
- щільність замороженого продукту (кг/м^3);
- теплопровідність свіжого продукту (Вт/м K);
- теплопровідність замороженого продукту (Вт/м K);
- температура замерзання продукту ($^{\circ}\text{C}$);
- латентне тепло замерзання продукту (Дж/кг);
- коефіцієнт конвекції повітря всередині камери ($\text{Вт/м}^2 \text{K}$).
- геометрія продукту.

Вибір основних компонентів включає: конденсаційний блок, випарник, розширювальний клапан.

1. Вибір конденсаторного блока. Для системи заморожування було вирішено обрати конденсаційний блок через його практичність та середню холодинну потужність морозильної установки. При виборі повітряного конденсаційного блока необхідно знати тип холодоагенту, що використовується в системі R-404a, холодинну потужність, температуру випаровування, максимальну робочу температуру навколишнього середовища, значення перегріву газу, що всмоктується компресором, а також частоту та напругу електроживлення. Для системи заморожування обрано конденсаційний блок, який разом з випарником працюватиме з холодопродуктивністю 11,05 кВт при температурі випаровування $-29,7^{\circ}\text{C}$. В таблиці 2.2 наведено параметри конденсаційного блока, рисунок 2.1.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Параметри конденсаторного блоку

Параметри	Параметри системи охолодження
Тип конденсаторного блоку	Охолоджений повітрям
Модель	LN114/4PES-12Y
Кількість	1
Охолодження	R-404a
Холодопродуктивність	10,64 кВт
Кількість вентиляторів	2
Компресор	Напівгерметичний
Напруга	440 / 3 / 60
Вага обладнання	268 кг
Довжина x висота x ширина, мм	1356 x 920 x 773

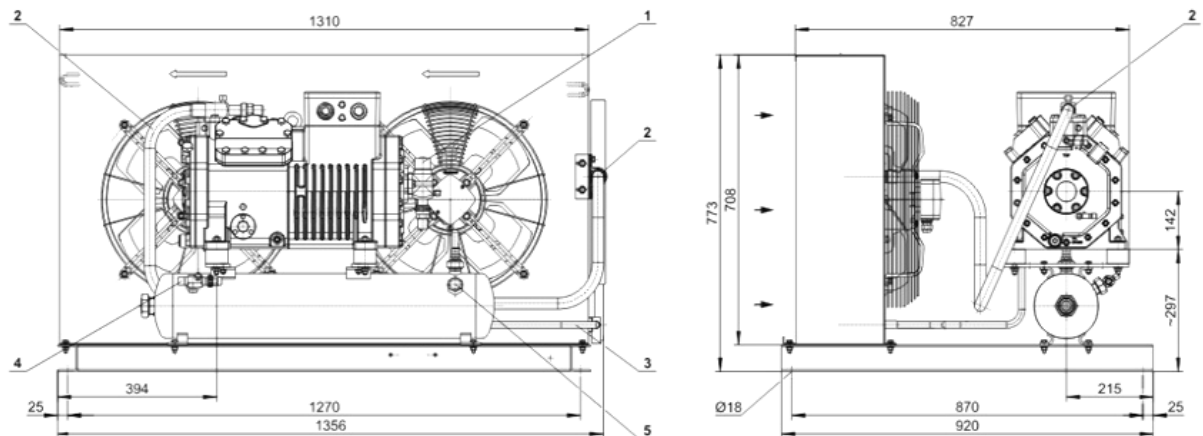


Рисунок 2.1 – Конденсаторний блок

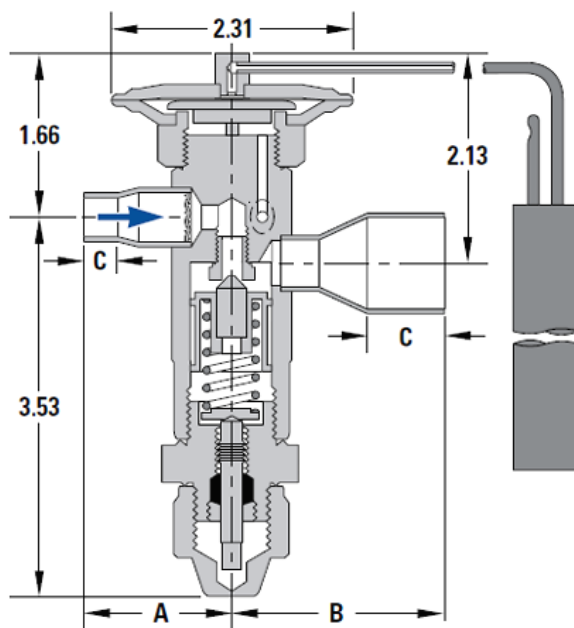
2. Вибір випарника. Під час вибору випарників типу з примусовою конвекцією необхідно знати холодопродуктивність, температуру випаровування, кінцеву температуру продукту, що заморожується та тип використовуюваного холодоагенту. Слід враховувати, що відповідно до конструкції морозильної камери випарники повинні встановлюватися рівномірно по всій машині, щоб забезпечити рівномірний потік холодного повітря через продукт, а також займати більшу частину довжини машини, щоб уникнути втрат обхідного потоку в продукті. Кінцева температура заморожування продукту становить -18°C , тому буде взята температура повітря для заморожування -20°C . Далі застосовується коефіцієнт корекції відповідно до різниці температур між випарником і температурою повітря 9, 10 і 11 Кельвін, при постійній температурі випаровування -30°C [4, 20-21]. Обрано випарник Helpman THOR-B 324-12, який працює разом із конденсаторним агрегатом Bitzer LN114/4PES-12Y-40P, з холодопродуктивністю 11,05 кВт при температурі випаровування $-29,7^{\circ}\text{C}$ та з різницею температур між випарником і повітрям для заморожування 10,5 К. Температура повітря для заморожування для кінцевої температури продукту -18°C буде дорівнювати $-19,5^{\circ}\text{C}$. В таблиці 2.3 наведено параметри випарника.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 2.3 – Параметри випарника

Параметри	Значення
Тип випарника	Примусова конвекція
Модель	THOR-B 324-10 H2/5 400
Кількість	1
Охолодження	R-404a
Завантаження холодоагенту	4,7 кг
Холодопродуктивність	11 кВт
Потік повітря	30 000 м ³ /год
Тип розморожування	Електричне розморожування, 230В
Розморожування	Електричний, 14,14 кВт
Тип двигуна	IP55
Електродвигун	1200 Вт
Напруга	440 / 3 / 60
Вага обладнання	137 кг
Довжина x висота x ширина, мм	2120 x 1065 x 880

3. Розширювальний клапан. Вибір розширювального клапана здійснюється з урахуванням різниці в тисках конденсації та випаровування, а також з урахуванням перепаду тиску в рідинній трубі, охолоджувальна ємність (загальне теплове навантаження випарників) та тип холодоагенту R-404a.



Обирається клапан з об'ємністю, що дорівнює або трохи перевищує охолоджувальну ємність. Обираємо модель типу S, що відповідає холодоагенту R-404a з номінальною охолоджувальною здатністю 4 тони. Клапан має зовнішній регулятор діаметром 1/4". Тому модель обирається: SEE- 4 – 2,94 1/2 x 5/8 x 1/4 x 5". В таблиці 2.4 наведено параметри розширювального клапана, рисунок 2.2.

Рисунок 2.2 – Термостатичний розширювальний клапан

Для розрахунку розмірів та підбору системи клапанів використовуються як орієнтир принципи охолодження за допомогою механічного стиснення, а також пропускна здатність клапанів, серед яких можна виділити такі положення [10, 29]:

- швидкості руху холодоагенту в різних фізичних станах обмежують діаметри труб, що використовуються;
- потужність компресора визначається масою рідини, яку потрібно всмоктувати;
- потужність охолодження та перепади тиску через використовувані клапани представляють додаткові зміни температури, які слід враховувати у встановлених потужностях охолодження обладнання;
- тип використаної системи: у випадку тунелю використовується рециркульована система з коефіцієнтом рециркуляції 4:1, що вказує на здатність охолоджувача до випаровування в випарнику, встановленому в тунелі.

Таблиця 2.4 – Параметри термостатичного розширювального клапана

Параметри	Значення
Модель	SEE- 4 – 2,94 1/2 x 5/8 x 1/4 x 5''
Зовнішнє підключення	1/4'' (зовнішній діаметр для паяння)
Охолоджувач	R-404a

У процесі роботи статичного тунелю для заморожування створюється замкнене коло, яке змушує його плавно переміщуватися зверху і знизу. Це змушує сировину прискорювати процес замерзання, а температура діє швидше, швидше досягаючи серця матеріалу. У цих тунелях холодне повітря генерується компресорами і розподіляється через вентилятори. Елементи системи: ізольовані контейнери, стрічковий перемішувач з нержавіючої сталі, випарник, вентилятор, конденсаторний блок. Запропоновано систему, яка включає дві підсистеми: перша – для контролю виробництва та досягнення точки замерзання, друга – для стабілізації продукції при температурах нижче -18°C. Лотки будуть оснащені стрічковими перемішувача з датчиками, які у випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад, третій з п'яти піднімати його ближче до вентиляторів (рис. 2.3).

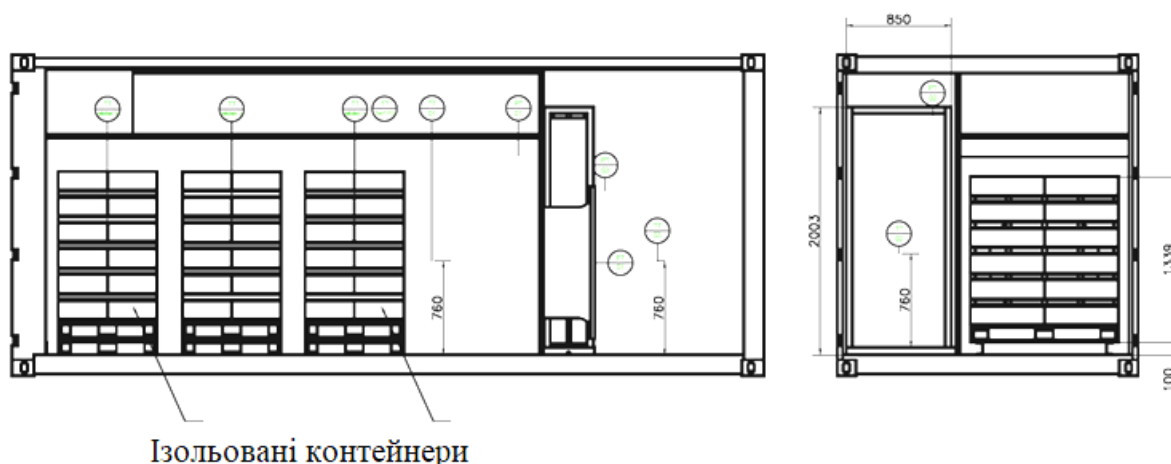


Рисунок 2.3 – Тунель для заморожування оснащений датчиками

У зв'язку з можливим нерівномірним розподілом повітря в тунелі вважається за доцільне підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами. Запропоновано систему, яка включає дві підсистеми: перша для контролю процесу та досягнення точки замерзання, друга для стабілізації продукції при температурах нижче -18°C . Лотки будуть оснащені датчиками, які будуть контролювати температуру заморожування, у зв'язку з можливим нерівномірний розподіл повітря в статичному тунелі. У випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад третій з п'яти, це буде фіксуватися та стабілізуватися другою підсистемою за допомогою засобів автоматизації. Лоток в тунелі, який має найнижчу швидкість повітря і найнижчі температури показники повітря навколо продукту потребують найбільшого часу для заморожування. Лоток, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Система автоматизації надасть сигнал про завершені циклу лише тоді, коли самий теплий лоток досягне цільової температури, а саме -18°C .

Оптимізація спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, щоб підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами за рахунок:

- впровадження реверсивного обдування, а саме застосування осьових вентиляторів із циклічною зміною напрямку потоку кожні 15-30 хвилин, що забезпечуватиме заморожування на ближніх і дальніх полицях;

- оснащення контейнерів стрічковими переміщувача з датчиками, які у випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад, третій з п'яти піднімати його ближче до вентиляторів;

- застосування частотного регулювання компресорів та вентиляторів, за рахунок зниження обертів двигунів на фінальній стадії заморожування, коли теплове навантаження від продукту падає, що сприятиме економії енергії до 30%.

На основі вище зазначеного можна вважати, що тунелі для заморожування продуктів класифікують за способом дії, конструкцією та типом продукту. За основним принципом роботи та станом продукту під час обробки їх поділяють на статичні та динамічні. У статичних тунелях продукт залишається нерухомим протягом усього циклу заморожування, а у динамічних системах продукт постійно рухається всередині тунелю за допомогою автоматизованих механізмів. Процес роботи статичного тунелю ґрунтується на заморожуванні продуктів за допомогою примусового повітря. У цьому обладнанні холодне повітря циркулює через сировину, яка розміщена на лотках над якими знаходиться випарник. Вентилятор приєднаний до випарника, що направляє потік повітря до візків, а інший вентилятор на протилежному кінці всмоктує повітря, що пройшло через лотки утворюючи замкнений контур, температура в якому поступово знижується до заданої.

Задля вибору обладнання здійснено енергетичний розрахунок, задля визначення необхідної холодопродуктивності для заморожування. Для системи заморожування було обрано конденсаторний блок через його практичність та середню холодильну потужність морозильної установки. Під час вибору

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випарників було враховано холодопродуктивність, температуру випаровування, кінцеву температуру продукту, що заморожується та тип використовуваного холодоагенту. Відповідно до конструкції морозильної камери випарники повинні встановлюватися рівномірно по всій машині, щоб забезпечити рівномірний потік холодного повітря через продукт, а також займати більшу частину довжини машини, щоб уникнути втрат обхідного потоку в продукті. Обрано випарник, який працює разом із конденсаторним агрегатом з холодопродуктивністю 11,05 кВт при температурі випаровування $-29,7^{\circ}\text{C}$. Вибір розширювального клапана здійснюється з урахуванням різниці в тисках конденсації та випаровування, а також з урахуванням перепаду тиску в рідинній трубі, охолоджувальна ємність. Обрано клапан з об'ємністю, що дорівнює або трохи перевищує охолоджувальну ємність. Параметри роботи морозильної камери, що обробляється та обраного обладнання є наступними: температура конденсації – 39°C , температура випарювання $-29,7^{\circ}\text{C}$, кінцева температура продукту в термальному центрі -18°C , розрахункова температура навколишнього середовища – 20°C .

У зв'язку з можливим нерівномірним розподілом повітря в тунелі вважається за доцільне підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами. Запропоновано систему, яка включає дві підсистеми: перша для контролю процесу та досягнення точки замерзання, друга для стабілізації продукції при температурах нижче -18°C . Лотки будуть оснащені датчиками, які будуть контролювати температуру заморожування, у зв'язку з можливим нерівномірним розподілом повітря в статичному тунелі. У випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад третій з п'яти, це буде фіксуватися та стабілізуватися другою підсистемою за допомогою засобів автоматизації. Лоток в тунелі, який має найнижчу швидкість повітря і найнижчі температури показники повітря навколо продукту потребують найбільшого часу для заморожування. Лоток, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Система автоматизації надасть сигнал про завершені циклу лише тоді, коли самий теплий лоток досягне цільової температури, а саме -18°C .

Оптимізація спрямована на усунення можливого нерівномірного розподілу повітря в холодильному обладнанні, що може призвести до нерівномірного часу заморожування, що вимагає збільшення повітряного потоку навколо продукту задля підвищення швидкості повітря біля продукту та зниження температури повітря в просторах між шарами за рахунок:

- впровадження реверсивного обдування, а саме застосування осьових вентиляторів із циклічною зміною напрямку потоку кожні 15-30 хвилин, що забезпечуватиме заморожування на ближніх і дальніх полицях;
- оснащення контейнерів стрічковими переміщувача з датчиками, які у випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад, третій з п'яти піднімати його ближче до вентиляторів;
- застосування частотного регулювання компресорів та вентиляторів, за рахунок зниження обертів двигунів на фінальній стадії заморожування, коли теплове навантаження від продукту падає, що сприятиме економії енергії на 30%.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Оптимізація повітряного потоку в тунелі для заморожування

Заморожування – це спосіб довготривалого зберігання сировини, що краще зберігає зовнішній вигляд, смак і поживну цінність їжі, ніж інші методи. У замороженому стані хімічні реакції, мікробна активність і метаболізм клітин у їжі значно обмежені, щоб сировина не була схильна до руйнування. Попит на продукти харчування з мінімальною обробкою та без добавок стимулює подальше зростання заморожених продуктів. Однак доведено, що заморожування має певні негативні наслідки для якості сировини, включно з механічними пошкодженнями, концентрацією заморожування, опіком у морозильній камері, рекристалізацією тощо, що обмежує широке застосування цієї технології у збереженні харчових продуктів [6, 12, 16]. Щоб мінімізувати погіршення якості сировини, спричинене заморожуванням, використовуються деякі нові технології. Заморожування продуктів вважається одним із найдавніших методів збереження харчових продуктів. Зазвичай традиційний метод заморожування передбачає зниження температури страви до -18°C або нижче. Якість сировини залежить від кількох факторів, зокрема проектування систем, кристалізації льоду, фазових змін, часу заморожування та інших.

Сировина зберігається шляхом заморожування, що передбачає зниження температури продукту до рівня, коли всередині структури продукту починають утворюватися кристали льоду. Щоб знизити швидкість реакцій, що призводить до погіршення якості продукту, мета процесу – знизити температуру продукту настільки, наскільки це економічно вигідно. Заморожування може підтримувати низьку температуру сировини, знижуючи активність води та запобігаючи росту мікроорганізмів. Однак постійне пошкодження матеріалу може виникнути, коли кристали льоду великі, рясні та розподілені нерівномірно [12]. Відтак розвиток льоду є критично важливим параметром, який потрібно контролювати під час виробництва та зберігання заморожених продуктів. Фізико-хімічні та біологічні механізми, що контролюють руйнування їжі, сповільнюються, але не зупиняються заморожуванням. При температурі нижче -18°C ріст мікроорганізмів зупиняється, а під час замороженого зберігання неферментні та ферментативні зміни відбуваються значно повільніше.

І швидкість замерзання, і тривалість відіграють значну роль у рості та розподілі кристалів льоду. Повільне заморожування створює великі та неправильні позаклітинні кристали льоду, що призводить до руйнування клітин і зниження сенсорних особливостей. Поява технологій швидкого заморожування є надзвичайно корисною для продовження терміну зберігання

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Іванов</i>				Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Гончаренко</i>						<i>Аркушів</i>
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>						
<i>Затверд.</i>	<i>Омельченко</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
						39	5

продуктів. Швидкі процеси заморожування покращують якість і подовжують термін зберігання сировини, запобігаючи росту мікроорганізмів, знижуючи активність води та зменшуючи хімічні й ферментативні реакції шляхом утворення дрібних і однорідних внутрішньоклітинних і позаклітинних кристалів льоду по всій тканині. Хоча високі темпи заморожування краще захищають тканинну структуру, ніж при повільному заморожуванні, надто швидке заморожування призводить до механічних тріщин, особливо у великих продуктах із високим вмістом вологи та низькою пористістю.

Тунельна машина швидкого заморожування – це високоефективний пристрій для заморожування, розроблений для промислової обробки харчових продуктів. Його тунельна структура дозволяє сировині безперервно проходити через низькотемпературне середовище на виробничій лінії, досягаючи рівномірного замерзання. Він широко використовується для виробництва м'яса, морепродуктів, фруктів, овочів та готових до вживання страв. Тунельна машина швидкого заморожування працює переважно завдяки високошвидкісній циркуляції повітря та низькотемпературній системі охолодження. Сировини потрапляє в тунель через конвеєрну стрічку і високошвидкісне холодне повітря швидко забирає тепло. Водночас система контролю температури забезпечує рівномірну температуру по всьому тунелю, запобігаючи переохолодженню або перегріву [28]:

- швидке охолодження: температура поверхні сировини та ядра за короткий час падає до ідеальної точки замерзання;
- зменшене утворення кристалів льоду: швидке заморожування утворює дрібні кристали льоду, захищаючи структури харчових клітин;
- волога та утримання поживних речовин: зменшує втрату вологи та виснаження поживних речовин під час заморожування.

У сучасній харчовій промисловості тунельні повітряні морозильники є критично важливими для швидкого заморожування продуктів, зберігаючи якість, текстуру та безпеку. Однак ці системи можуть споживати значну кількість енергії, якщо їх не експлуатувати ефективно. Оптимізація енергоспоживання не лише знижує операційні витрати, а й підтримує сталий розвиток у великомасштабному виробництві продуктів харчування. У типовому тунелі швидкої заморозки велика частина повітря проходить над і під піддонами замість того, щоб потрапляти через повітряний проміжок. Це скорочення повітряного потоку призводить до поганого використання холодного повітря та подовження часу заморозки. Щоб компенсувати це, збільшують потік повітря, використовуючи більші вентилятори, а температуру повітря знижують для підвищення теплопередачі [22]. Споживання енергії вентиляторами зростає в третій степені від потоку, і тому надзвичайне споживання енергії при поганому дизайні є значним. Нижча температура повітря в випарниках призводить до нижчих всмоктувальних температур для холодильного обладнання, що знижує ККД і збільшує витрату електроенергії.

В тунелях для заморожування холодильна система та повітряні вентилятори, як правило працюють безперервно, доки тунель не буде розвантажено. Холодильне навантаження від продукту зменшується зі

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниженням температури але вентилятори часто працюють на повній швидкості протягом усього періоду замерзання, що призводить до постійного теплового навантаження на замерзаючий тунель [24]. Якщо до повітряних вентиляторів немає приводу з регульованою швидкістю, інша можливість – вимкнути деякі повітряні вентилятори але це призвело до меншого зниження енергоспоживання порівняно з приводом з регульованою швидкістю. Коли швидкість повітряного вентилятора зменшувалося, час замерзання подовжували, а загальне споживання енергії зменшувалося. Зниження температури випарника призводить до коротшого часу замерзання але суттєво не впливало на загальне споживання енергії.

Значну економію енергії можна досягти шляхом оптимізації повітряного потоку через тунель, що призводить до більшої ефективності морозильника, що досягається за рахунок кращого використання повітря всередині морозильника. Потік повітря, що проходить над і під першими десятима піддонами, рухається по всьому морозильнику не отримуючи багато енергії від продукту. При вході в реверсивну камеру повітря змішується, а потім повертається до випарника після проходження через ще десять піддонів [22]. Також тут велика частина повітря проходить над і під піддонами. Перед випарником воно змішується з потоком повітря, що проходить через повітряні проміжки між продуктами, що призводить до зниження середньої температури повітря, що надходить у випарник, що зменшує його середню ефективність. Щоб компенсувати відсутню потужність, знижується температура всмоктування холодильного контуру, що збільшує загальне споживання енергії тунелем. Оптимізація повинна бути спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, що підвищує швидкість повітря біля продукту та знижує температуру повітря в просторах між шарами.

Задля цього було здійснено моделювання повітряного потоку в тунелі для заморожування. Результати моделювання показали, що третій піддон у тунелі має найнижчу швидкість повітря через роздільники і найнижчі температури повітря навколо продукту на піддоні. Це вказує на те, що третій піддон у промисловому тунелі потребують найбільше часу для заморожування. Отже, ці піддони визначають загальний час заморожування тунелю. Змодельований процес швидкостей та температур наведено на рисунку 3.1, оскільки рушійною силою заморожування є комбінований вплив швидкості та температури.

Піддон номер 1 у напрямку повітряного потоку має найкращі умови, найвищу швидкість повітря та найнижчу температуру повітря. Якщо дивитися на піддон 3, швидкість зліва від піддона, у напрямку потоку, дуже низька, що вказує на те, що останні лотки з лівого боку піддона 3 контролюють час заморожування і, відповідно, мають найбільший потенціал для оптимізації [22]. Розподіл температур також показує найвищу температуру для останніх коробок у напрямку потоку повітря для піддона 3. Оскільки температура є іншою рушійною силою теплопередачі то ця умова також збільшує час заморожування. Чим холодніші температури та вища швидкість, тим швидше буде відбуватися заморожування. Більшість потоку спрямовується по каналах

над та під продуктами.

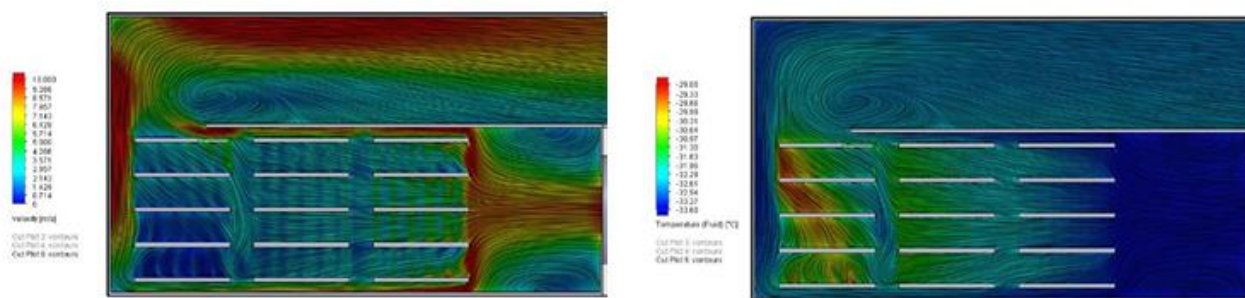


Рисунок 3.1 – Швидкість повітря навколо сировини

Нерівномірний розподіл повітря по тунелю призводить до нерівномірного часу заморожування піддонів. Перший піддон має сприятливі умови і буде заморожуватися значно швидше, ніж останній, через вищу швидкість повітря, що проходить через повітряні простори та нижчі температури порівняно з повітрям у останньому піддоні. Лоток в морозильній камері, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Розподіляючи повітря розумно та враховуючи різницю в часі заморожування, потік повітря можна звести до мінімуму протягом усього логістичного циклу тунелю. Моделювання показало, що останній піддон, тобто піддон 3 має найгірші умови і потребує найбільшого часу для замороження, щоб скоротити час заморожування умови для останнього піддону потрібно покращити [22]. Оптимізація процесу заморожування, а отже, ефективності процесу шокowego заморожування, досягається шляхом оптимізації контакту між повітрям у морозильній камері та коробками на піддоні. Лотки розділені прокладками, які забезпечують відстань між рядами сировини, дозволяючи холодному повітрю досягати верхньої та нижньої частин сировини (рис. 3.2).

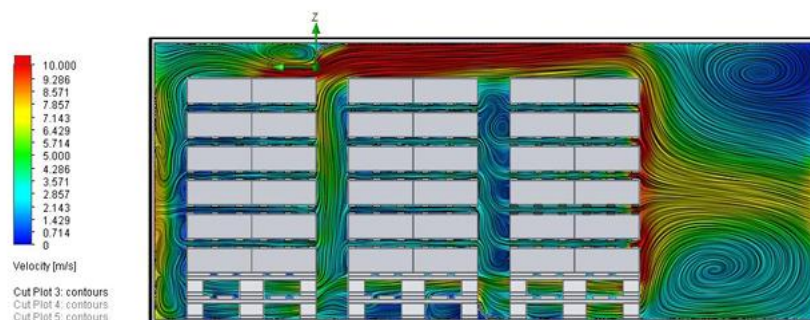


Рисунок 3.2 – Перерозподіл потоку повітря за допомогою перегородок в шаховому порядку

Велика частина повітря протікає з великою швидкістю над і під піддонами, щоб спробувати краще використати потік повітря, було досліджено спробу покращити його розподіл за допомогою перегородок. Повітря з верхньої частини піддонів буде спрямовуватися вниз перед третім піддоном, а повітря, що циркулює під піддоном, спрямовуватися вгору перед другим піддоном. Розподіли потоку та температури зазнав помітного покращення. Для випадку з перегородками температура повітря в останньому піддоні буде приблизно

на 1,5°C нижчою, ніж у традиційному процесі, що значно покращить час заморожування.

На основі вище зазначеного можна вважати, що заморожування може підтримувати низьку температуру сировини, знижуючи активність води та запобігаючи росту мікроорганізмів. Однак постійне пошкодження матеріалу може виникнути, коли кристали льоду великі, рясні та розподілені нерівномірно. Відтак розвиток льоду є критично важливим параметром, який потрібно контролювати під час виробництва та зберігання заморожених продуктів. Фізико-хімічні та біологічні механізми, що контролюють руйнування їжі, сповільнюються, але не зупиняються заморожуванням. При температурі нижче -18°C ріст мікроорганізмів зупиняється, а під час замороженого зберігання неферментні та ферментативні зміни відбуваються значно повільніше.

Зазначено, що у сучасній харчовій промисловості тунельні повітряні морозильники є критично важливими для швидкого заморожування продуктів, зберігаючи якість, текстуру та безпеку. Однак ці системи можуть споживати значну кількість енергії, якщо їх не експлуатувати ефективно. Оптимізація енергоспоживання не лише знижує операційні витрати, а й підтримує сталий розвиток у великомасштабному виробництві продуктів харчування.

Оптимізація повинна бути спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, що підвищує швидкість повітря біля продукту та знижує температуру повітря в просторах між шарами. Задля цього було здійснено моделювання повітряного потоку в тунелі для заморожування. Результати моделювання показали, що третій піддон у тунелі має найнижчу швидкість повітря і найнижчі температури повітря навколо продукту на піддоні, що вказує на те, що третій лоток в тунелі потребує найбільше часу для заморожування. Отже, ці піддони визначають загальний час заморожування тунелю.

Нерівномірний розподіл повітря по тунелю призводить до нерівномірного часу заморожування піддонів. Перший піддон має сприятливі умови і буде заморожуватися значно швидше, ніж останній, через вищу швидкість повітря, що проходить через повітряні простори та нижчі температури порівняно з повітрям у останньому піддоні. Лоток в морозильній камері, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Розподіляючи повітря розумно та враховуючи різницю в часі заморожування, потік повітря можна звести до мінімуму протягом усього логістичного циклу тунелю.

Оптимізація процесу заморожування, а отже, ефективності процесу заморожування, досягається шляхом оптимізації контакту між повітрям у морозильній камері та коробками на піддоні. Пропонується лотки розділити прокладками в шаховому порядку, які забезпечать відстань між рядами сировини, дозволяючи холодному повітрю рівномірно досягати усієї сировини. Повітря з верхньої частини піддонів буде спрямовуватися вниз перед третім піддоном, а повітря, що циркулює під піддоном, спрямовуватися вгору перед другим піддоном. Для випадку з перегородками температура повітря в останньому піддоні буде приблизно на 1,5°C нижчою, що значно покращить час заморожування.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів. У роботі зазначено, що заморожування – це спосіб довготривалого зберігання сировини, що краще зберігає зовнішній вигляд, смак і поживну цінність. Проте можливий нерівномірний розподіл повітря в холодильному обладнанні, що може призвести до нерівномірного часу заморожування, що в свою чергу вимагає оптимізації, яка повинна бути спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, щоб підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для заморожування фруктів та овочів. Зазначено, що процес заморожування складається з чотирьох етапів: передзаморожування, перенасичення, етап заморожування та етап глибокого заморожування. На першому етапі тепло видаляється з продукту до досягнення точки замерзання, на другому температура опускається нижче значення замерзання, під час третього видаляється приховане тепло і вода перетворюється на лід, а на останньому етапі температура сировини знижується до температури зберігання.

Здійснено аналіз тунелів для швидкого заморожування, які є високоефективним обладнанням, що застосовується для промислової обробки харчових продуктів. Працює переважно завдяки високошвидкісній циркуляції повітря та низькотемпературній системі охолодження. Тунелі заморожування продуктів класифікують за способом дії, конструкцією та типом продукту. За основним принципом роботи та станом продукту під час обробки їх поділяють на статичні та динамічні. У статичних тунелях продукт залишається нерухомим протягом усього циклу заморожування, а у динамічних системах продукт постійно рухається всередині тунелю за допомогою автоматизованих механізмів.

В другому розділі оптимізовано статичний тунель для заморожування процес роботи якого ґрунтується на заморожуванні продуктів за допомогою примусового повітря (конвекція). У цьому обладнанні холодне повітря циркулює через сировину, яка розміщена на лотках над якими знаходиться випарник. Вентилятор приєднаний до випарника, що направляє потік повітря до візків, а інший вентилятор на протилежному кінці всмоктує повітря, що пройшло через лотки утворюючи замкнений контур, температура в якому поступово знижується до заданої.

Задля вибору обладнання здійснено енергетичний розрахунок, задля визначення необхідної холодопродуктивності для заморожування. Для системи заморожування було обрано конденсаторний блок через його практичність та середню холодильну потужність морозильної установки. Під час вибору

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Іванов			Удосконалення холодильного обладнання для інтенсифікації процесу заморожування фруктів та овочів				Літ.		Арк.		Аркушів	
Перевір.		Гончаренко									44		2	
Н. Контр.		Омельченко												
Затверд.		Омельченко			ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО									

випарників враховано, що вони мають бути встановлені по всій машині, щоб забезпечити рівномірний потік холодного повітря через продукт, а також займати більшу частину довжини машини, щоб уникнути втрат обхідного потоку в продукті. Обрано випарник, який працює разом із конденсаторним агрегатом з холодопродуктивністю 11,05 кВт при температурі випаровування -29,7°C. Обрано клапан з об'ємністю, що дорівнює або трохи перевищує охолоджувальну ємність. Параметри роботи морозильної камери: температура конденсації – 39°C, температура випарювання -29,7°C, кінцева температура продукту досягає -18°C, розрахункова температура навколишнього середовища – 20°C.

У зв'язку з можливим нерівномірним розподілом повітря в тунелі вважається за доцільне підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами. Запропоновано систему, яка включає дві підсистеми: перша для контролю процесу та досягнення точки замерзання, друга для стабілізації продукції при температурах нижче -18°C. Лотки будуть оснащені датчиками, які будуть контролювати температуру заморожування, у зв'язку з можливим нерівномірним розподілом повітря в статичному тунелі. У випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад третій з п'яти, це буде фіксуватися та стабілізуватися другою підсистемою за допомогою засобів автоматизації. Лоток в тунелі, який має найнижчу швидкість повітря і найнижчі температури показники повітря навколо продукту потребують найбільшого часу для заморожування. Лоток, який замерзає найдовше є тим що контролює час заморожування. Система автоматизації надасть сигнал про завершені циклу лише тоді, коли самий теплий лоток досягне цільової температури, а саме -18°C.

Оптимізація спрямована на збільшення повітряного потоку навколо продукту, щоб підвищити швидкість повітря біля продукту та знизити температуру повітря в просторах між шарами за рахунок:

- впровадження реверсивного обдування, а саме застосування осьових вентиляторів із циклічною зміною напрямку потоку кожні 15-30 хвилин, що забезпечуватиме заморожування на ближніх і дальніх полицях;

- оснащення контейнерів стрічковими переміщувача з датчиками, які у випадку, якщо лоток буде не достатньо охолоджуватися, наприклад, третій з п'яти піднімати його ближче до вентиляторів;

- застосування частотного регулювання компресорів та вентиляторів, за рахунок зниження обертів двигунів на фінальній стадії заморожування, коли теплове навантаження від продукту падає, що сприятиме економії енергії до 30%.

В третьому розділі здійснено оптимізацію лотків задля рівномірного розподілу повітряного потоку в тунелі для заморожування. Ефективність процесу заморожування досягається шляхом оптимізації контакту між повітрям у морозильній камері та лотками на піддоні. Пропонується здійснити заміну суцільних дек на сітчасті, що забезпечить вертикальне та діагональне продування продукту, а також лотки розділити прокладками, які забезпечать відстань між рядами сировини, дозволяючи холодному повітрю рівномірно досягати усієї сировини.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Замороження харчових продуктів. Режим доступу: <https://www.zahidholod.com.ua/tpost/4006jk4p21-zamorozhennya-harchovih-produktiv>.
2. Способи заморожування продуктів. Режим доступу: <https://elar.tsatu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/12bd5a82-e95f-473d-bc14-34356ce08f10/content>.
3. Нестеров Д., Ковальов О. Огляд перспективних способів заморожування харчових продуктів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матеріали V Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, м. Запоріжжя, 01-24 листопада 2023 р. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С.179-181.
4. Diseño de un congelador de maíz entero con capacidad de 100 kg/hr. URL: <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/feddd6842-7803-4104-8c89-749fe2a9d786/content>.
5. Application of vacuum for the intensification of fruits and vegetables freezing. URL: <https://theses.hal.science/tel-04854931v1>.
6. Congelamento isocoro: vantaggi e svantaggi di una tecnologia emergente per la conservazione degli alimenti. URL: https://thesis.unipd.it/retrieve/a8c61f80-2e76-4377-aecc-20eb2ab7d271/Giordano_Davide.pdf.
7. Швидкоморозильні тунелі. Режим доступу: <https://primeholod.com.ua/uk/obladnannya/obladnannya-shokovoji-zamorozki/shvidkomorozilni-tuneli>.
8. Скороморозильні флюїдизаційні апарати тунельного типу. Режим доступу: <https://bmholod.com.ua/solution/promyslovyu-kholod/liniya-shokovoju-zamorozki/skoromorozylni-flyuyidyzatsiyni-aparaty>.
9. Революція у світі заморожених продуктів. Режим доступу: <https://www.itpgroup.com.ua/blog/iqf-tekhnologii-revoliutsiia-u-sviti-zamorozhenykh-produktiv>.
10. Dimensionamiento y selección de un túnel de congelación para el procesamiento de banano. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/34451/D-CD88308.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
11. Análisis aerodinámico del flujo de aire en el interior de un túnel de congelación. Propuestas de mejora para reducir tiempos de procesamiento. URL: <https://idus.us.es/items/5991dbd5-bb4a-4488-9172-004cd53a19ae>.
12. A comprehensive review on isochoric freezing: a recent technology for preservation of food and non-food items. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/fb/d3fb00146f>.
13. Нові тренди у технологіях заморожування плодів і овочів. Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f7df929a-a1b7-41ca-b0e8-4d6e244c31c8>.
14. Ізохорне заморожування продуктів – новітня технологія. Режим доступу: https://harch.tech/2021/10/28/izohorne_zamorozuvannia/.
15. Ізохоричний процес. Режим доступу:

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://stud.com.ua/104694/prirodnavstvo/izohorichniy_protse.

16. Effects of electric and magnetic field on freezing characteristics of gel model food. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996923001114>.

17. Food freezing: emerging techniques for improving quality and process efficiency comprehensive review. URL:

<https://www.researchgate.net/publication/340799168>.

18. Determinación de la capacidad operativa del túnel de congelación de una empresa pesquera. URL:

https://www.researchgate.net/publication/361035044_Determinacion_de_la_capacidad_operativa_del_tunel_de_congelacion_de_una_empresa_pesquera.

19. Види компресорів холодильного обладнання. Переваги та недоліки. Режим доступу: <https://redmedua.com/uk/rnews/61-vidy-kompressorov-holodilynogo-oborudovaniya-dostoinstva-i-nedostatki>.

20. Класифікація та типи випарників холодильних машин. Режим доступу: <https://zaoknom.com.ua/tekhnolohii/klasyfikatsiia-ta-typy-vyparnykh-kholodylnykh-mashyn/>.

21. Три різні типи випарників для холодильників. Режим доступу: <https://nenwell.com/uk/news/three-types-of-refrigerator-evaporators-and-their-performance/>.

22. Energy optimization of batch freezing tunnel for meat. URL: <https://energiforskning.dk/files/media/document/348-036%20Slutrapport%20%28engelsk%29.pdf>.

23. Simulación numérica de un túnel de enfriamiento rápido por aire forzado para analizar el flujo de aire según la ventilación del envase de cartón y el orden de apilamiento en el enfriado de la uva. URL: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/670160/Vargas_ME.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

24. The effect of reduced air fan speed on freezing times and energy consumption in a freezing tunnel. URL: <https://www.researchgate.net/publication/324475787>.

26. Конденсатори для холодильних систем: основи, які потрібно знати. Режим доступу: <https://profportal.com.ua/blog/kondensatory-dlya-kholodylnykh-system-osnovy-yaki-potribno-znaty/>.

27. Типи холодильних конденсаторів. Режим доступу: <https://vektorlux.com/information/typy-kholodylnykh-kondensatoriv>.

28. Tunnel quick freezing cooling machine: the key solution to improve food processing efficiency. URL: <https://www.kangliantech.com/news/industry-news/tunnel-quick-freezing-cooling-machine-the-key-solution-to-improve.html>.

29. Canalización del aire en el sistema cyclone. URL: <https://palinox.com/congelacion-industrial/cyclone-congelacion-iqf/>.

					ННІЕТ КНУ.142.ЕМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		