

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний технологічний університет  
Кафедра холодильних установок і кондиціонування повітря



## ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на тему "Проект тимчасового холодильника для попереднього охолодження  
свіжозібраних плодів для південного регіону України"

Здобувача Доков Д.І.

2 курсу ЕНск-141а групи

Керівник доц. Яковлев Ю.О.  
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: проф. Хмельнюк М.Г.  
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 30.05.2025 р., протокол № 10

Завідувач кафедри ХУКП Михайло ХМЕЛЬНЮК  
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса - 2025

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально–науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики  
ім. В.С. Мартиновського

Кафедра Холодильних установок і кондиціонування повітря

Ступінь вищої освіти - Бакалавр

Спеціальність - 142 "Енергетичне машинобудування"

Освітня програма - "Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри ХУКП \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ М. Хмельнюк

“ 03 ” березня 2025 року

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Доков Денис Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проект тимчасового холодильника для попереднього охолодження свіжозібраних плодів для південного регіону України» \_\_\_\_\_

Затверджена наказом ОНТУ від “26” вересня 2024 року наказ № 576-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 31.05.2025 р.

3. Вихідні дані роботи:

Тимчасовий холодильник для попереднього охолодження свіжозібраних яблук місткістю 20 тон.

Кліматична зона - південний регіон України.

Температура у камері холодильника +6 °С

Холодоагент: R290.

4. Перелік питань, які потрібно розробити. Реферат. Вступ. 1. Техніко-економічне обґрунтування проекту. 2. Опис принципу роботи холодильної машини та технологічної схеми процесу охолодження продукції 3. Розрахунок будівельних розмірів тимчасового холодильника. 4. Калоричний розрахунок. 5. Тепловий розрахунок холодильного циклу та підбір компресора. 6. Розрахунок повітряного конденсатора. 7. Розрахунок повітроохолоджувача, 8. Розрахунок діаметрів трубопроводів і підбор допоміжного обладнання 9. Охорона праці, Інформаційні джерела.

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

Презентація в PowerPoint

Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Проф. Хмельнюк М.Г.	03.03.2025 р.	23.05.2025 р.

7. Дата видачі завдання 03.03.2025 р. \_\_\_\_\_

Керівник \_\_\_\_\_ Яковлев Ю.О.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Доков Д.І.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	При мітка
1	Вступ. Техніко-економічне обґрунтування.	20.03.2025 р.	
	Опис принципу роботи холодильної машини та технологічної схеми процесу охолодження продукції.		
2	Розрахунок будівельних розмірів тимчасового холодильника.	10.04.2025 р.	
	Калоричний розрахунок.		
	Тепловий розрахунок холодильного циклу та підбір компресора.		
3	Розрахунок повітряного конденсатора.	30.04.2025 р.	
	Розрахунок повітроохолоджувача	.	
4	Розрахунок діаметрів трубопроводів і підбір допоміжного обладнання	20.05.2025 р.	
	Охорона праці. Реферат		
5	Оформлення пояснювальної записки	30.05.2025 р.	

Здобувач - дипломник \_\_\_\_\_ Доков Д.І.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Яковлев Ю.О.

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційної роботи відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач - дипломник Доков Д.І.  
ПІБ Підпис

## ЗМІСТ

<b>РЕФЕРАТ</b> .....	5
<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА</b> .....	8
1.1. Техніко-економічне обґрунтування проекту .....	8
1.2. Опис принципу роботи холодильної машини та технологічної схеми процесу охолодження продукції.....	24
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА</b> .....	26
2.1. Розрахунок будівельних розмірів тимчасового холодильника .....	26
2.2. Калоричний розрахунок .....	28
2.3. Тепловий розрахунок холодильного циклу та підбір компресора.....	37
2.4. Розрахунок повітряного конденсатора.....	41
2.5. Розрахунок повітроохолоджувача .....	47
2.6. Розрахунок діаметрів трубопроводів і підбір допоміжного обладнання.....	53
<b>РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ</b> .....	55
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	75
<b>ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА</b> .....	76

					<i>КРБ.ХУКП.1.576-03.2.6.</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Доков Д.І.				Проект тимчасового холодильника для попереднього охолодження свіжозібраних плодів для південного регіону	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Яковлев Ю.О.					4	76	
Реценз.						<i>ОНТУ гр. ЕНск-141а</i>		
Н. Контр.								
Затверд.								

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з: 76 сторінок друкованого тексту, 11 рисунків, 4 таблиці, 11 посилань на літературні джерела. В кваліфікаційній роботі вирішено задачу розробки тимчасового холодильника для попереднього охолодження свіжозібраних плодів місткістю 20 тон.

Будівля холодильника одноповерхова з висотою камери 4 м, з розміром 4x6 м. Передбачається охолодження тимчасового холодильника для попереднього охолодження свіжозібраних яблук з температурним режимом при  $t_k = +6$  °C, відносній вологості повітря  $\phi_k = 0,75$ .

В якості холодильного агента було прийнято R290. Система холодопостачання спроектованого тимчасового холодильника - централізована. Для забезпечення стійкої роботи холодильника був підібраний компресорноконденсаторний агрегат з напівгерметичним компресором фірми Bitzer і повітряним конденсатором фірми KFL.

**Ключові слова:** система холодопостачання – тимчасовий холодильник – компресорно-конденсаторний агрегат – R290.

## ABSTRACT

Qualification work consists of: 76 pages of printed text, 11 figures, 4 tables, 11 references to literary sources. In the qualification work, the task of developing temporary a refrigerator for pre-cooling freshly picked fruits with a capacity of 20 tons.

The refrigerator building is one-story with a height of 4 m chambers, and a size of 4x6 m. Provision is made for cooling a temporary refrigerator for pre-cooling freshly picked apples with a temperature regime at  $t_c = -2$ °C, relative air humidity  $\phi_c = 0,75$ .

R290 was used as a refrigerant. The cooling system of the designed refrigerator is centralized. To ensure stable operation of the refrigerator, a compressor-condensing unit with a semi-hermetic compressor from Bitzer and an air condenser from KFL is used.

**Keywords:** cold supply system - temporary a refrigerator - compressor-condenser unit – R290.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки південного регіону України. Завдяки сприятливому клімату та родючим ґрунтам, тут вирощується значна кількість фруктів і овочів, які мають високий експортний потенціал. Проте однією з основних проблем після збору врожаю є його швидке псування через високі температури навколишнього середовища, особливо в літній період. Без належного охолодження плоди втрачають товарний вигляд, якість і поживні властивості, що призводить до значних економічних втрат для виробників.

Промислове зберігання плодів завжди має бути орієнтоване на прогресивніші методи технології зберігання. У цих умовах основним критерієм ефективності технології та послідовності всіх операцій є рівень збереження продукції, зниження втрат та витрат.

Важливою умовою забезпечення збереження врожаю та стабільності його якості є створення безперервного холодильного ланцюга від поля до споживача та його першої ланки – попереднього охолодження плодоовочевої продукції безпосередньо після збирання

Попереднє охолодження плодів одразу після збору дозволяє зменшити усихання, сповільнити або запобігти розвитку мікроорганізмів, значно продовжити термін їх зберігання, зменшити втрати врожаю та покращити якість продукції при транспортуванні. Це особливо важливо для фермерських господарств, які займаються вирощуванням ягід, кісточкових та інших ніжних фруктів, що є вразливими до температурних коливань. Водночас у малих і середніх фермерських господарствах часто відсутні відповідні технологічні умови для швидкого охолодження плодів перед їх подальшим транспортуванням або зберіганням.

Проект тимчасового холодильника для попереднього охолодження свіжозібраних плодів спрямований на розробку ефективного, мобільного та енергоефективного рішення для фермерських господарств південного регіону

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

України. Головною метою є створення доступної за вартістю та простої у використанні системи охолодження, яка дозволить знизити втрати врожаю, підвищити якість продукції та покращити конкурентоспроможність фермерських господарств на ринку.

Запропонована технологія передбачає використання сучасних енергоефективних холодильних установок, які можуть працювати як від електромережі, так і від альтернативних джерел енергії, що особливо важливо для регіонів з нестабільним електропостачанням. Крім того, модульність конструкції дозволить адаптувати холодильник під різні обсяги врожаю та особливості транспортування.

Впровадження такого рішення сприятиме розвитку фермерських господарств, мінімізує ризики втрат врожаю та підвищить економічну ефективність виробництва. З огляду на актуальність проблеми та зростаючий попит на якісну сільськогосподарську продукцію, проект має значний потенціал для масштабного впровадження в регіоні.

						Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 1. Техно-економічне обґрунтування проекту

#### Технологічні режими обробки плодів після збирання при закладці на зберігання

У сучасному сільському господарстві важливу роль відіграє правильна організація післязбиральної обробки фруктів. Саме цей етап визначає, чи збережеться якість продукції до моменту реалізації, переробки або споживання. Технологічні режими обробки плодів — це сукупність заходів, які дозволяють уповільнити біохімічні процеси старіння та гниття, зберегти смакові якості, форму, масу та товарний вигляд плодів. Режими обробки варіюються в залежності від виду культури, її фізіологічного стану на момент збору, кліматичних умов та тривалості планованого зберігання [1,2].



Рис. 1. Плоди для закладці на зберігання

#### Первинне сортування.

Перший і дуже важливий етап — це первинне сортування плодів. Його мета — відсіяти ті екземпляри, які не підлягають тривалому зберігання. До них належать:

									Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					8

- пошкоджені під час збирання або транспортування плоди,
- перезрілі,
- уражені шкідниками або хворобами.

Сортування може здійснюватися вручну, що дозволяє ретельно оцінити кожен плід, або механізовано, з використанням ліній автоматичного контролю. При цьому враховується форма, розмір, забарвлення, наявність тріщин, плям чи ознак загнивання.

Цей процес є критично важливим, оскільки навіть один зіпсований плід у партії може стати джерелом зараження та знищити всю тару продукції.

### **Калібрування.**

Після сортування здійснюється калібрування — розподіл плодів за масою, розміром та зовнішніми характеристиками. Калібровані партії легше упаковувати, транспортувати та зберігати. Крім того, однорідні за параметрами фрукти мають **однакову динаміку дозрівання та старіння**, що мінімізує втрати під час зберігання.

Наприклад, у разі зберігання яблук в одному ящику бажано, щоб усі вони були приблизно однакової маси — це знижує ризик механічного травмування та сприяє рівномірному охолодженню.

### **Попереднє охолодження.**

Охолодження після збору — один із найважливіших процесів, що визначає подальшу якість зберігання. Після збирання плоди продовжують "дихати", виділяючи тепло, вологу та етилен. Якщо не знизити температуру швидко, це може призвести до прискорення дозрівання, втрати вологи та гниття

### **Основні методи охолодження:**

Повітряне охолодження — продукти охолоджуються потоком холодного повітря.

Гідроохолодження — використовують для ягід або плодів, що не бояться короткочасного контакту з водою.

Вакуумне охолодження — ефективний метод для листових овочів, але інколи застосовується й для фруктів.

						Лист
						9
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Температурні режими попереднього охолодження:

- яблука, груші — +2...+4 °С.
- вишня, черешня — 0...+1 °С.
- вологість — 90–95% (щоб уникнути втрат маси).

Швидке охолодження дозволяє зменшити температурний стрес і суттєво подовжити терміни зберігання.

### **Обробка фунгіцидами або антисептиками.**

Під час зберігання плоди можуть бути вражені грибковими захворюваннями, такими як сіра гниль, борошниста роса, чорна гниль тощо.

Щоб уникнути цих проблем, застосовуються засоби обробки плодів, зокрема:

- фунгіциди (напр., тіабендазол, імазаліл),
- біологічні антисептики,
- натуральні засоби (оцтовий розчин, ефірні олії — у випадках органічного виробництва).

Обробку проводять шляхом занурення плодів у розчин або обприскування, після чого продукція має висохнути. Обов'язкове дотримання строків очікування перед споживанням та відповідність нормам безпеки.

### **Упакування.**

Якісне упакування захищає плоди від механічних пошкоджень і сприяє циркуляції повітря. Для різних видів плодів використовують відповідні види тари:

- дерев'яні або пластикові ящики — для яблук, груш,
- лотки з картону — для персиків, нектаринів,
- сітки — для цитрусових,
- м'які прокладки (папір, пінополіетилен) — для ягід або делікатних фруктів.

Упакування також важливе для маркування продукції: на етикетках вказують сорт, дату збору, господарство, країну походження, партію тощо.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

## **Зберігання в модифікованому або контрольованому газовому середовищі (МА/КА)**

Застосування технологій МА/КА дозволяє створити такі умови, в яких процеси дихання плодів значно сповільнюються. Принцип дії:

знижується вміст кисню до 1.5–2%,

підвищується вміст вуглекислого газу до 1.5–3%,

підтримується вологість на рівні 90–95%.

Це ефективно для довготривалого зберігання яблук, груш, а іноді й овочів. Температура в таких камерах зазвичай коливається у межах 0...+2 °С. Таке середовище гальмує старіння, розвиток мікроорганізмів та зберігає товарний вигляд плодів навіть через 6–8 місяців.

Таблиця 1. Оптимальні умови зберігання для основних видів фруктів

Вид плоду	Температура зберігання	Вологість	Орієнтовний строк
Яблука	0...+2 °С	90–95%	4–8 місяців
Груші	–1...+0.5 °С	90–95%	2–5 місяців
Виноград	0 °С	90–95%	1–4 місяці
Персики, нектарини	0...+1 °С	90–95%	2–4 тижні
Вишня, черешня	0...+1 °С	90–95%	до 2 тижнів

### **Мобільне охолодження безпосередньо на полі**

Однією з інноваційних технологій є використання мобільних холодильників прямо на місці збору врожаю. Особливо це актуально для ягід, персиків, черешень, які дуже швидко втрачають якість.

Попередня термічна обробка плодів відразу після їх збирання сприяє кращому збереженню продукції. Найбільший ефект зберігання досягається тоді, коли плоди надходять у фруктосховище не пізніше, як через 4-6 годин після їх збирання. затримка з доставкою плодів до фруктосховища на кілька днів знижує тривалість зберігання на 2-3 місяці.

### **Переваги мобільного охолодження:**

- збереження свіжості одразу після збору;
- зниження температурного стресу;
- економія ресурсів на транспортування;
- можливість використання у віддалених регіонах (живлення від сонячних панелей або генераторів).

Завдяки таким мобільним рішенням зменшуються втрати врожаю, підвищується ефективність господарства та збільшується прибуток.

Післязбиральна обробка плодів є не менш важливою, ніж сам процес вирощування. Правильне сортування, охолодження, обробка антисептиками, пакування та зберігання в контрольованих умовах дозволяють зберегти врожай на місяці без втрати якості. Інтеграція сучасних технологій, зокрема мобільного охолодження, відкриває нові горизонти для аграрного бізнесу, дозволяючи мінімізувати втрати та максимально реалізувати потенціал продукції.

Ось декілька практичних прикладів використання мобільних холодильників в Україні для охолодження плодів безпосередньо на місці збору врожаю — це стає дедалі популярнішим серед фермерів, особливо в регіонах з інтенсивним садівництвом:

Фермерські господарства в Миколаївській та Херсонській областях. Охолоджують абрикоси, персики, черешні, сливи. Використовують мобільні холодильники (переобладнані рефрижераторні причепа), які встановлюють прямо в саду або поряд із ним.

Перевага: швидке охолодження до транспортування зменшує втрати від перезрівання, особливо у спекотну погоду.

Яблучні сади у Вінницькій та Закарпатській областях. Охолоджують яблука літніх сортів, які дуже чутливі до температур. Використовують мобільні контейнери з охолоджувачами, які розміщують між рядами саду, збір відразу йде в тару, що зберігається в холодильнику.

Перевага: зберігається товарний вигляд і аромат — важливо для експорту.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

Полуниці та малина — Львівська, Івано-Франківська області. Охолоджують ягоди, що дуже швидко псуються. Використовують малі мобільні холодильники на базі фургонів (типу Mercedes Sprinter з холодильним відсіком).

Перевага: ягоди охолоджуються вже за кілька хвилин після збору, що критично для експорту до ЄС.

Фермери з Черкащини — виноградники. Охолоджують столовий виноград. Використовують мобільні холодильники, які встановлюють у зоні пакування, куди плоди доставляються безпосередньо з лози.

Перевага: зменшується ризик "запарювання" грона, довше зберігається свіжість і колір.

Кооперативи в Одеській області. Охолоджують: мікс плодкових культур — черешня, слива, нектарин. Використовують: декілька фермерів орендують спільний мобільний холодильник на сезон збору.

Перевага: економія на логістиці + зменшення витрат на стаціонарні сховища.

Будівництво стаціонарних фруктосховищ у місцях виробництва не завжди є рентабельним. Це пов'язано з тим, що врожайність в окремих районах коливається в залежності від кліматичних умов в окремі роки. Крім того, потреба в холодильних ємностях виникає лише в період масового збору врожаю, тобто протягом 2-3 місяців.

Найвигіднішим є в цій ситуації застосування невеликих швидкокомтованих холодильників повної заводської готовності. Вони дозволяють при відносно невеликих витратах домогтися збереження якості та збільшення терміну зберігання плодоовочевої продукції. Водночас одночасно зменшуються втрати сільськогосподарської продукції на 10-15%.

Пропонована конструкція пересувного фруктосховища дозволяє повному здійснити організацію холодильного ланцюга під час руху харчових продуктів від виробника до споживача, що призводить також до зменшення витрат рослинної сировини порівняно з існуючим положенням.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

Тимчасоий холодильник складається з холодильного складу та пересувною холодильної установки. Холодильна машина виготовлена на причепі трейлера.

Холодильний склад представляє швидкозбірну споруду, яка зібрана з окремих каркасів. Панелі виконують одночасно функцію каркасу і теплоізоляції. Кожна панель являє собою каркас, обтягнутий прогумованою тканиною (рис. 2). Внутрішній повітряний простір панелі для зменшення теплообміну радіації розділений екраном із металізованого поліетилену. Повітряні прошарки в панелях виконують роль ізоляційного шару.

Кожна панель має замки, в одній панелі розташовується гачок, а в суміжній панелі на тому ж рівні розташоване кріплення. Для герметизації стиків при складанні використовуються смуги паролону.

Холодильник встановлюється на спеціально вирівняному майданчику, який повинен бути укочений котками.

Майданчик повинен мати розміри 6х12 м і перебувати в безпосередній близькості від саду.

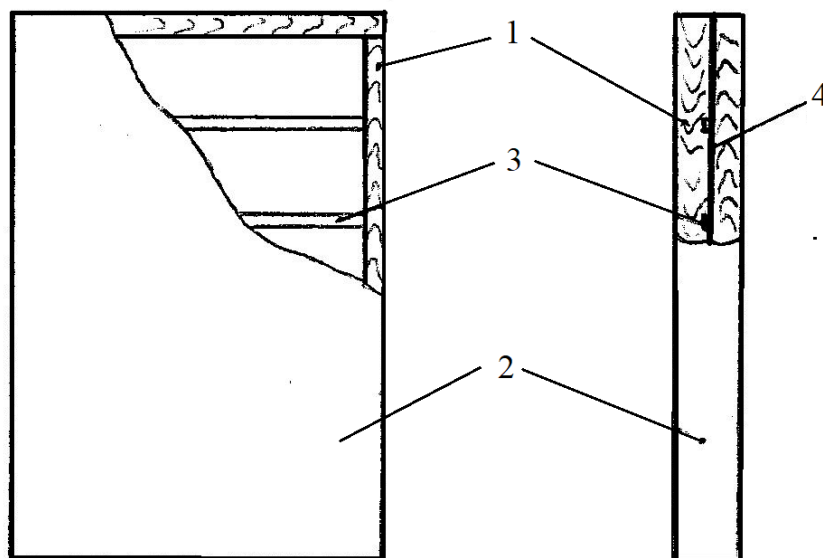


Рис. 2. Конструкція панелі: 1 – дерев'яний каркас; 2 – прогумова тканина; 3 – дерев'яні рейки; 4 – поліетиленова металізована плівка.

Складання споруди холодильника проводиться після встановлення на майданчику штабеля з яблуками та зводиться воно безпосередньо навколо

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		14

штабеля. Складання проводять 4 людини, Починаючи з кутової панелі вони поступово збирають стіни по периметру. Після цього на стіну укладаються панелі стелі.

Після завершення процесу охолодження та прибуття транспорту для відправки продукції на стаціонарні фруктосховища холодильна машина вимикається. З протилежного торця споруди знімаються дві панелі та утворюється прохід 4 x 4 м. За допомогою електрокара контейнери з плодами завантажуються у напівпричепа на відправлення, а холодильник знову завантажуються зібраними у контейнери плодами. Торцеві панелі встановлюють місце і цикл повторюється.

При експлуатації з тимчасового холодильника потреба у водопостачанні та каналізації відсутня.

Після закінчення збору врожаю на даній плантації холодильник демонтується та перевозиться на нове місце, де знову швидко збирається.

### **Принцип тимчасового холодильника**

Тимчасовий холодильник для охолодження плодів працює за принципом примусової циркуляції повітря через плоди, які укладені в спеціальні контейнери або на решітчасті поверхні. Охоложене повітря проходить через продуктову масу, рівномірно забираючи тепло та забезпечуючи швидке зниження температури плодів.

Основні методи пневматичного охолодження включають: **продування холодним повітрям** – плоди розташовуються у контейнерах з перфорованими стінками, через які потік охолодженого повітря рівномірно проходить, забезпечуючи ефективне охолодження.

Тимчасовий холодильник для охолодження плодів складається з наступних основних елементів:

**Охолоджувальна камера** – теплоізольоване приміщення, в якому розміщується продукція.

**Система вентиляції та повітропроводів** – забезпечує рівномірний розподіл охолодженого повітря по всьому об'єму продукції.

					КРБ.ХУКП.1.576-03.2.4.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

**Холодильна установка** – генерує охолоджене повітря, яке подається в систему циркуляції.

**Фільтраційна система** – очищує повітря від пилу та мікроорганізмів, запобігаючи псуванню продукції.

**Контролер температури та вологості** – дозволяє автоматично підтримувати необхідний режим охолодження.

**Мобільна платформа (за необхідності)** – якщо комплекс має бути транспортувальним, він може розміщуватися на базі причепа або контейнера.

У сучасному світі, на фоні посилення екологічних проблем та глобального потепління, особливу увагу приділяють вибору холодоагентів у системах охолодження та кондиціонування повітря. Традиційні фреони, що містять хлор і фтор, мають високий потенціал руйнування озонового шару (ODP) та значний потенціал глобального потепління (GWP). У зв'язку з цим все більшої популярності набувають природні холодоагенти, які є екологічно безпечними та енергоефективними.

Природні холодоагенти — це речовини, що існують у природі та можуть використовуватись у холодильних і кондиціонерних системах без істотного негативного впливу на довкілля. До них відносять:

- вуглеводні (пропан R290, ізобутан R600a, етилен тощо);
- вуглекислий газ (CO<sub>2</sub> або R744);
- аміак (NH<sub>3</sub> або R717);
- вода (R718);
- повітря (R729).

Ці речовини характеризуються низьким або нульовим потенціалом руйнування озону (ODP = 0) та низьким або нульовим потенціалом глобального потепління (GWP ≈ 0–3).

**Пропан (R290)** — це насичений вуглеводень з хімічною формулою C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, який широко використовується як природний холодоагент. Його популярність зростає завдяки високій енергоефективності, екологічній безпеці та відносно простому застосуванню в сучасному холодильному обладнанні. Головна

					КРБ.ХУКП.1.576-03.2.4.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

перевага пропану — його нульовий ODP та надзвичайно низький GWP (~3). Він демонструє високу продуктивність при низьких і середніх температурах охолодження, зокрема в побутових холодильниках, кондиціонерах, теплових насосах.

Однак пропан відноситься до горючих речовин (клас A3), тому при його використанні необхідно дотримуватись суворих заходів безпеки: обмеження кількості зарядженого холодоагенту, належна вентиляція, спеціальна електроізоляція. Незважаючи на ці обмеження, R290 залишається одним з найбільш перспективних природних холодоагентів у побутовому та комерційному секторах.

**Ізобутан (R600a)** — ще один вуглеводневий природний холодоагент, що широко застосовується, особливо у побутових холодильниках і морозильниках. Його хімічна формула —  $C_4H_{10}$ . Він має низький тиск кипіння ( $-11,7\text{ }^\circ\text{C}$ ), що робить його ідеальним для невеликих холодильних контурів. Як і пропан, він має  $ODP = 0$  і  $GWP \approx 3$ , тобто практично не впливає на озоновий шар і клімат.

Ізобутан відзначається гарною термодинамікою та високим коефіцієнтом енергетичної ефективності. Головний недолік — горючість. Через це при його використанні виробники обмежують кількість речовини в контурі, використовують відповідну ізоляцію та конструктивні заходи безпеки. Завдяки простоті та низькій вартості, R600a зберігає провідну позицію в холодильній техніці для дому.

**Етилен (R1150)** — це ненасичений вуглеводень з хімічною формулою  $C_2H_4$ , що має надзвичайно низьку температуру кипіння ( $-103,7\text{ }^\circ\text{C}$ ), що дозволяє використовувати його в супернизькотемпературних холодильних системах, наприклад у медичних або наукових лабораторіях. Цей холодоагент має нульовий ODP і дуже низький GWP, що робить його екологічно безпечним.

Втім, основним обмеженням у використанні є висока горючість (клас A3), що потребує суворого контролю за безпекою: іскробезпечна апаратура, надійна вентиляція, суворі герметизація. Через ці фактори його застосовують обмежено

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17

— там, де потрібні наднизькі температури і забезпечено високий рівень безпеки.

**Аміак ( $\text{NH}_3$ )** — один з найстаріших та найефективніших природних холодоагентів, який і досі широко використовується у промисловому охолодженні, зокрема в харчовій промисловості, логістиці, на виробництвах. Його переваги: висока теплопровідність, низька в'язкість,  $\text{ODP} = 0$  і  $\text{GWP} = 0$ . Крім того, аміак має здатність до самозмащування, що зменшує потребу в мастилах.

Однак основним обмеженням є токсичність і подразнювальна дія на слизові оболонки. Крім того, він агресивно впливає на кольорові метали (мідь, латунь), тому вимагає використання сталі або алюмінію в конструкціях. Незважаючи на це, завдяки енергоефективності та низькій вартості аміак залишається незамінним у великих холодильних установках.

**Вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$  або R744)** — природний негорючий холодоагент з  $\text{ODP} = 0$  та  $\text{GWP} = 1$  (вважається референтом для порівняння  $\text{GWP}$ ). Він екологічно безпечний, нетоксичний, недорогий і широко доступний. Його температура сублімації  $-78,5$  °C, що дозволяє застосовувати його в різноманітних системах: від супермаркетів до теплових насосів та охолодження в транспорті.

Недоліком  $\text{CO}_2$  є дуже високий робочий тиск (до 130 бар), що вимагає дорогих, міцних компонентів та складної автоматизації. Проте сучасні технології, зокрема каскадні та транскритичні  $\text{CO}_2$ -системи, успішно долають ці обмеження. Завдяки екологічності та регуляторному тиску на HFC-холодоагенти, популярність  $\text{CO}_2$  стрімко зростає.

**Вода** — це, без перебільшення, найбезпечніший природний холодоагент. Вона має  $\text{ODP} = 0$ ,  $\text{GWP} = 0$ , не токсична, не горюча, дешева та доступна. Її недоліком є висока температура кипіння (100 °C), тому вона застосовується в високотемпературних теплових насосах, абсорбційних охолоджувачах та системах утилізації тепла. Крім того, вода потребує роботи у вакуумному середовищі, що ускладнює конструкцію.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

Незважаючи на це, у контексті теплових насосів останніх поколінь R718 набирає обертів, оскільки дозволяє досягати високих температур гарячої води без шкідливих викидів.

**Повітря** — це універсальний і абсолютно безпечний холодоагент, що має  $ODP = 0$  та  $GWP = 0$ . Його використання досить обмежене через низьку ефективність і високу енергоспоживаність компресорів. Але в умовах, коли важлива екологічна безпека, відсутність токсичності та доступність — наприклад, в авіації, експериментальному обладнанні або у військових технологіях — повітря може бути хорошим варіантом.

Здебільшого, повітряне охолодження використовується як допоміжна технологія або як частина розширених циклів, коли традиційні холодоагенти недоцільні.

У результаті проведеного аналізу фізико-хімічних властивостей основних природних холодоагентів встановлено, що кожна речовина має свої переваги та недоліки, які визначають доцільність її використання в конкретних умовах. Ретельно порівнюючи такі параметри, як енергоефективність, температура кипіння, глобальний потенціал потепління (GWP), озоноруйнівний потенціал (ODP), безпека та сумісність з матеріалами, було обґрунтовано вибір пропану (R290) як оптимального холодоагенту для використання у холодильній машині тимчасового холодильника.

Пропан є екологічно безпечним ( $ODP = 0$ ,  $GWP \approx 3$ ), володіє високими термодинамічними показниками, забезпечує ефективне охолодження при низьких витратах енергії, має добру теплопередачу, а також добре сумісний з сучасними компресорами та мастилами. Його температура кипіння  $-42,1\text{ }^\circ\text{C}$  дозволяє ефективно працювати в низькотемпературних системах.

Єдиним суттєвим недоліком пропану є його висока горючість, однак завдяки сучасним технологіям безпеки (захист від іскри, вентиляція, обмеження маси холодоагенту в контурі), цей фактор не є критичним. Більше того, у побутових і комерційних системах R290 вже успішно використовується в усьому світі.

									Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					19

Отже, враховуючи екологічні вимоги, енергоефективність і технічну доцільність, пропан (R290) є найкращим вибором для застосування як робоче тіло в холодильній машині тимчасового холодильника.

Для забезпечення роботи холодильної машини обрано компресорно-конденсаторний агрегат, що містить напівгерметичний поршневий компресор типу Bitzer 4H-15.2 та повітряний конденсатор.

На сучасному етапі розвитку холодильної техніки серед малих і середніх потужностей найчастіше використовуються напівгерметичні та герметичні компресори. Їх популярність зумовлена низкою переваг порівняно з раніше поширеними відкритими компресорами [4,5]. Зокрема, вони не мають сальникового вузла, а електродвигун інтегрований у корпус компресора.

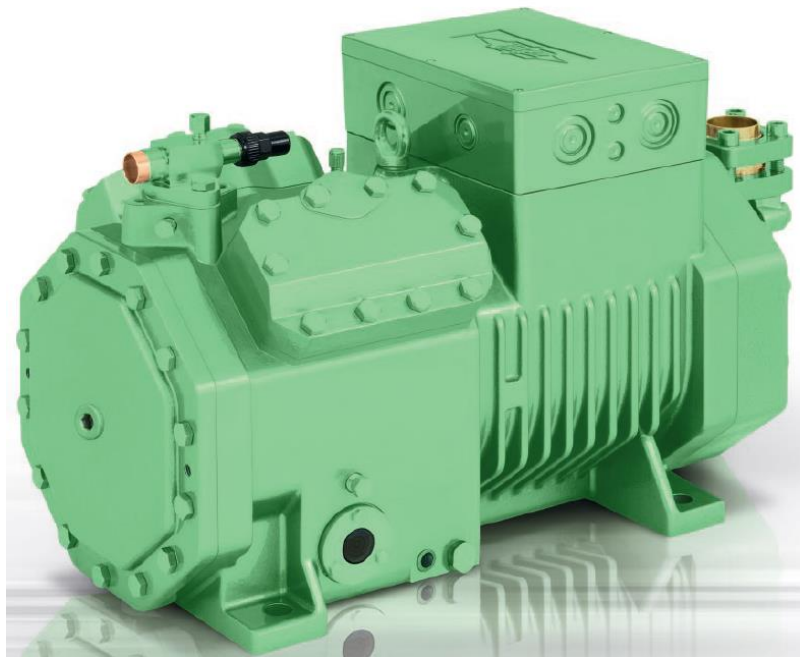


Рис. 3. Напівгерметичний компресор

Напівгерметичні компресори характеризуються підвищеною експлуатаційною надійністю, здатністю працювати на підвищених обертах, компактними габаритами (у середньому на 1,5 рази менші) і меншою масою (на  $\approx 40\%$  легші) порівняно з відкритими аналогами. Їх електродвигуни ефективно охолоджуються парами холодоагенту, що дозволяє забезпечити вищу

номінальну потужність та покращену віброакустичну характеристику. Крім того, монтаж і обслуговування таких компресорів є менш витратними.

Водночас, для їх коректної та безпечної експлуатації слід застосовувати холодоагенти, які не спричиняють деградації мідної обмотки статора. Також при тривалій роботі на малих навантаженнях можливе підвищення температури обмоток (до 125 °С), що висуває вимоги до теплоізоляційних матеріалів.

Компресор та електродвигун розміщуються в спільному корпусі, де ротор двигуна встановлюється безпосередньо на вал компресора. Це спрощує процеси монтажу та демонтажу. Відсутність сальникового ущільнення мінімізує ризик витоків холодоагенту і масла. Доступ до основних компонентів агрегату забезпечують знімні кришки корпусу.

Охолодження конденсаторів здійснюється за допомогою повітря, яке примусово переміщується вентиляторами.

У системах кондиціонування та холодильного обладнання перевагу часто надають повітряним конденсаторам із вентиляторним охолодженням. Їх вибирають тоді, коли необхідно забезпечити ефективне відведення тепла без використання рідин.

Основні переваги повітряних конденсаторів:

1. Незалежність від водопостачання — ідеальне рішення для регіонів з дефіцитом водних ресурсів.
2. Низькі витрати на експлуатацію — відсутність складної інфраструктури на кшталт насосів або градирень.
3. Простота монтажу — компактність і модульність конструкції.
4. Знижений ризик корозії — виключення контакту з водою.
5. Екологічна безпека — відсутність стічних вод та потреби у хімікатах.
6. Стабільна робота в різних умовах — ефективне охолодження незалежно від кліматичних факторів.
7. Адаптивність до автономних систем — підходять для мобільних або ізольованих об'єктів.



Рис. 4. Повітряний конденсатор KFLELK 46

Для холодильної машини використано повітряний конденсатор KFLELK 46, що належить до трубчасто-ребристого типу. Його конструкція передбачає мідні трубки діаметром  $16 \times 1$  мм із насадженими алюмінієвими ребрами товщиною 0,5 мм. Трубки розташовані шахово з кроком 40 мм, крок між ребрами — 4,5 мм. Повітряна циркуляція здійснюється двома осьовими вентиляторами діаметром 0,5 м.

Холодильна машина оснащується повітроохолоджувачем прямого охолодження, який був спроектований для умов охолодження тимчасового холодильника та забезпечував стабільне охолодження повітря..

Основні переваги застосування повітроохолоджувача:

1. Охолодження без води — тепло обмінюється безпосередньо із зовнішнім повітрям.
2. Простота теплової схеми — відсутність додаткових контурів сприяє мінімізації втрат.
3. Низьке енергоспоживання — працюють лише вентилятори.

4. Екологічність — немає споживання води та утворення стоків.
5. Довговічність та надійність — мінімальна кількість рухомих елементів.
6. Можливість цілорічної експлуатації — у зимовий період можлива реалізація фрікуулінгу.
7. Гнучке регулювання — незалежна робота двох охолоджувачів дозволяє адаптувати систему до змін навантаження.

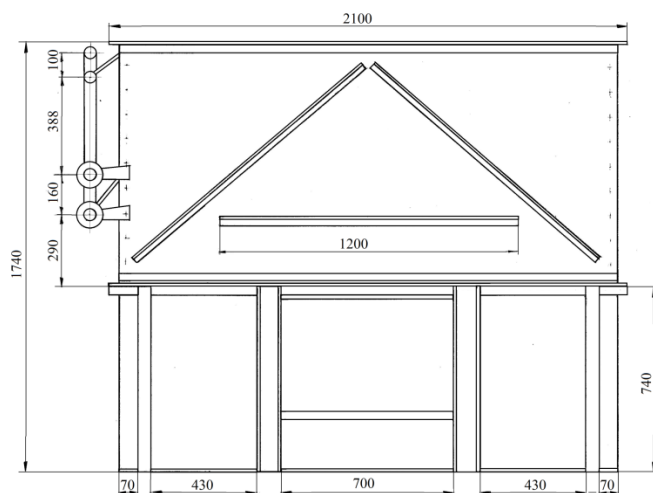


Рис. 5. Повітроохолоджувач

Повітроохолоджувач виготовлено на основі мідних труб діаметром  $16 \times 1$  мм, на які насаджено алюмінієві ребра товщиною 1 мм. Крок між ребрами становить 15 мм для перших 4-х рядів, а всі останні мають крок 10 мм. Трубки розміщено коридорно з кроком 40 мм по фронту та в напрямку руху повітря. Труби з'єднані U-подібними зворотними колінами у вертикальні змійовики, з яких формуються секції, зібрані в загальний повітроохолоджувач.

Випарник оснащено рідинним розподільником і газовим колектором, за допомогою яких його підключено до холодильного контуру.

У схемі холодильного обладнання передбачено ресивер і теплообмінник регенеративного типу. Останній виконаний у вигляді зварного корпусу, всередині якого прокладено змійовик з мідної труби ( $15 \times 1$  мм). Регенеративний теплообмін забезпечує одночасне переохолодження рідини та перегрів пари, що надходить у компресор, сприяючи підвищенню ефективності та стабільності роботи всієї системи.

## 1.2. Опис принципу роботи холодильної машини та технологічної схеми процесу охолодження продукції

Холодильна машина працює за звичайною схемою одноступеневої парокомпресійної холодильної машини з безпосереднім випаром пропану та повітряним охолодженням конденсатора.

У схему включені 6 напівгерметичний компресор, повітряний конденсатор, ресивер, 2 фільтри-осушувачі, 2 соленоїдні вентиля, 2 терморегулюючі вентиля, 2 повітроохолоджувачі і регенеративний теплообмінник.

Пари пропану стискаються в напівгерметичному компресорі до тиску конденсації і нагнітаються в конденсатор, де вони охолоджуються, а потім зріджуються за рахунок віддачі теплоти конденсації повітря, що обдуває зовнішню поверхню апарату. Рідкий пропан з конденсатора стікає в ресивер, який необхідний для запобігання переповненню конденсатора рідким холодильним агентом та забезпечення рівномірної подачі холодоагенту на дроселювання. З ресивера через фільтр-осушувач рідкий пропан надходить у регенеративний теплообмінник, потім поділяється на два потоки, які через соленоїдні вентиля поступають до терморегулюючих вентилів і далі через розподільники рідини (павуки) до охолоджувачів повітря.

У регенеративному теплообміннику рідкий пропан переохолоджується за рахунок теплообміну з холодними парами пропану, що виходять з охолоджувача повітря.

Фільтр-осушувач служить для видалення вологи, що потрапила в пропан, і для очищення агента від випадково потрапили в нього твердих домішок.

Соленоїдні вентиля перекидають рідинні лінії при зупинці компресора і тим самим оберігають охолоджувачі повітря від переповнення їх хладагентом при зупинці, що може призвести до гідравлічного удару. У терморегулюючих вентилях хладагент дроселюється від тиску конденсації до тиску кипіння, частково при цьому випаровуючись.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24

Більше або менше відкриття терморегулюючого вентиля залежить від величини перегріву пари агента, що виходить з охолоджувача повітря.

У трубках повітроохолоджувача відбувається повне випаровування пародидкостной суміші агента за рахунок тепла повітря, що продувається через охолоджувач повітря.

Пари пропану з газового колектора охолоджувача повітря потрапляють в регенеративний теплообмінник, де вони додатково перегріваються за рахунок теплообміну з рідким пропаном, що йде з ресивера. З регенеративного теплообмінника пари пропану відсмоктуються компресором, стискаються і направляються в конденсатор, тобто цикл повторюється.

Фреонова холодильна машина відповідно до відомого принципу створює умови для підтримки температури поверхні охолоджувача повітря в діапазоні від 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Повітря всмоктується з робочого об'єму сховища вентилятором, подається в міжтрубний простір охолоджувача повітря і в результаті контакту з холодною поверхнею знижує свою температуру. Охолоджене повітря з охолоджувача повітря по ізольованому повітроводу подається у верхню частину сховища. Потік холодного повітря проходячи над штабелями призводить до ежекції та змішування з теплішим повітрям усередині холодильника. Коли потік повітря сягає протилежної завантажувальної сторони, він втрачає швидкість і опускається вниз нижню. Оскільки всмоктувальне вікно розташоване в нижній частині стіни перед крайнім штабелем, повітря потрапить у нього проходячи крізь всі контейнери штабеля і сприймає тепло рослинної сировини. Підігріте повітря потрапляє в охолоджувач повітря і процес повторюється.

Процес охолодження сировини залежно від його виду, кількості та подальшого призначення ведеться до температури транспортування  $+5...+8^{\circ}\text{C}$ , або температури зберігання  $0...+2^{\circ}\text{C}$ .

Тривалість процесу охолодження визначається видом, кількістю та наступним призначенням сировини, способом упаковки, але не перевищує однієї доби

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 2.1. Розрахунок будівельних розмірів

Тарою для яблук будуть дерев'яні контейнери з габаритними розмірами 750 x 800 x 1200 мм. Місткість одного контейнера для яблук 250 кг.

Конейнер забезпечений дерев'яним піддоном, що забезпечує можливість багатоярусного штабелювання та застосування для вантажно-розвантажувальних робіт автотранспорту.

Визначимо необхідну кількість контейнерів  $n_k$ :

$$n_k = G / g = 20000 / 250 = 80 \text{ шт.}$$

де  $G = 20000$  - максимальне добове надходження вантажів;

$g = 250$  кг - вантажопідйомність контейнера.

Визначимо схему раціонального розміщення контейнерів з урахуванням максимальної уніфікації розмірів панелей:

кількість контейнерів по висоті - 4;

кількість контейнерів по ширині - 3;

кількість контейнерів за довжиною - 7.

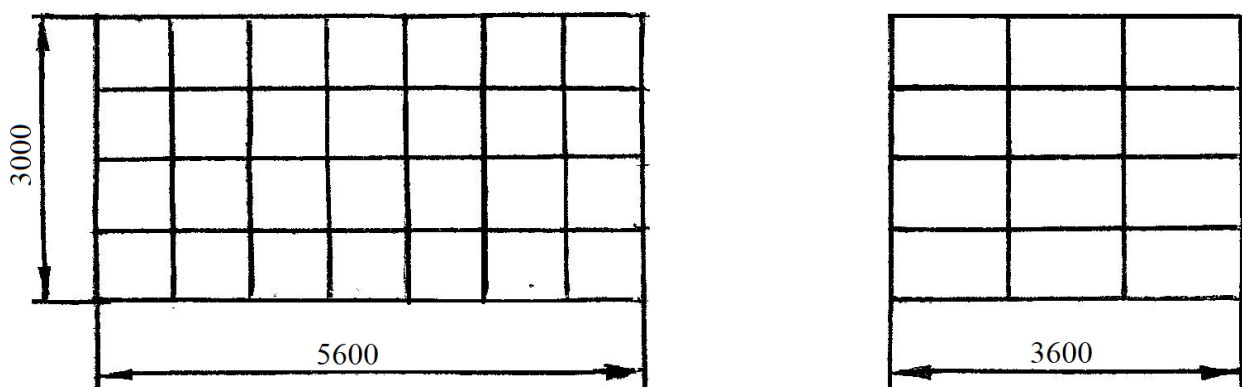


Рис. 6. Схема розміщення штабелів

Загальна ємність тимчасового холодильника становитиме:

$$G' = 4 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 250 = 21000 \text{ кг.}$$

Висота штабелю контейнерів

$$h = 4 \cdot 0,75 = 3,0 \text{ м.}$$

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

Ширина штабелю контейнерів

$$a = 3 \cdot 1,2 = 3,6 \text{ м.}$$

Довжина штабелю контейнерів

$$b = 7 \cdot 0,8 = 5,6 \text{ м.}$$

Вибираємо габаритні розміри панелей:

ширина – 2,0 м;

довжина – 4,0 м;

товщина – 0,16 м.

Габаритні розміри тимчасового холодильника:

ширина – 4,0 м;

довжина – 6,0 м;

висота – 4,0 м.

						Лист
						27
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2. Калоричний розрахунок

Вихідні дані:

Холодильна обробка яблук.

Тимчасовий холодильник збирається з окремих панелей розміром  $2 \times 4 \times 0,16$  м.

Споруда розташовується меридіонально, холодильна установка підключається до південної торцевої стінки.

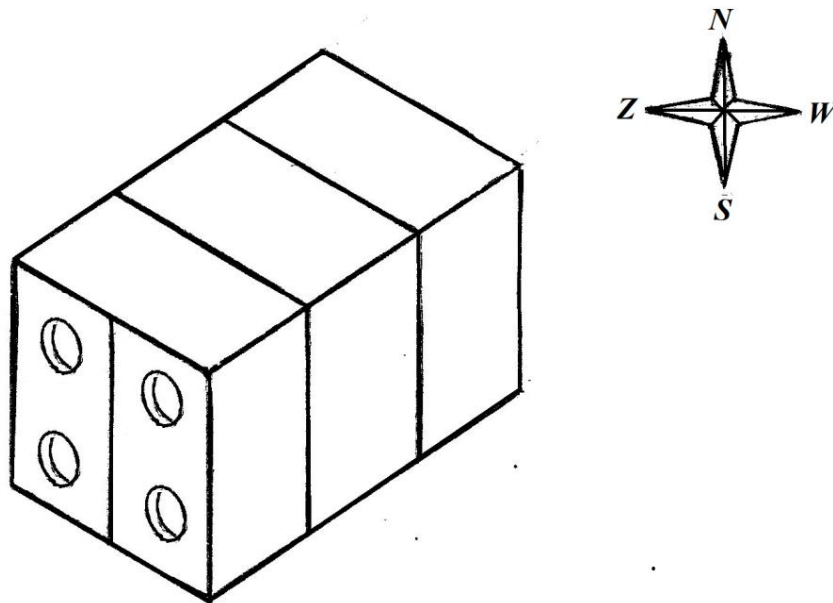


Рис. 7. Схема розташування тимчасового холодильника стосовно сторін світла

Розрахункова літня температура для південного регіону України становить  $t_n = 32^\circ\text{C}$ .

Оптимальна температура короткочасного охолодження яблук перед транспортуванням складає:  $+2^\circ\text{C} \dots +6^\circ\text{C}$ . Приймаємо температуру в камері -  $t_{\text{кам}} = +6^\circ\text{C}$ .

### Теплопритоки через огорожі.

Теплопритоки через огорожі складаються з теплопритоків, пов'язаних з різницею температур усередині камери і зовнішнім навколишнім середовищем  $Q_1'$  і сонячній радіації  $Q_{1c}$ :

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$Q_1 = Q_1' + Q_{1c}$$

Теплопритоки через огорожі, викликані різницею температур:

$$Q_1' = k_d \cdot F \cdot (t_{\text{зовн}} - t_{\text{кам}})$$

де  $k_d$  – дійсний коефіцієнт теплопередачі для даної огорожі  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;

$F$  – площа поверхні даної огорожі,  $\text{м}^2$ ;

$t_{\text{зовн}}$  – розрахункова літня температура довкілля,  $^{\circ}\text{C}$ , для м. Одеси  $t_{\text{зовн}} = 32$   $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{кам}} = 6$   $^{\circ}\text{C}$  – температура у камері холодильника;

Теплоприток від сонячної радіації:

$$Q_{1c} = k_d \cdot F \cdot \Delta t_c$$

де  $\Delta t_c$  – перегрів поверхні від дії прямого сонячного випромінювання,  $^{\circ}\text{C}$ .

По таблиці 9.1 [6] визначимо:

для даху  $\Delta t_{\text{сд}} = 14,9$   $^{\circ}\text{C}$ ;

для східної стіни  $\Delta t_{\text{сc}} = 9,8$   $^{\circ}\text{C}$ ;

для західної стіни  $\Delta t_{\text{сc}} = 11,7$   $^{\circ}\text{C}$ .

Теплопередачу через дві тверді стінки та прошарок повітря між ними можна розглядати як теплопередачу через складну тришарову стінку (рис. 7).

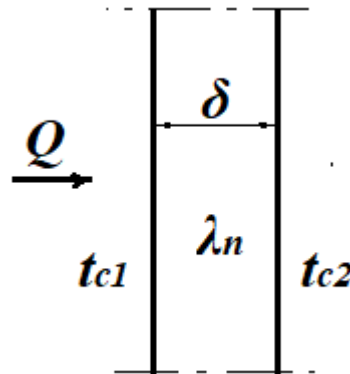


Рис. 8. Теплопередачі через панель огорожи

При такому завданні необхідно правильно вибрати коефіцієнт теплопровідності прошарку, так як тепло через прошарок передається не тільки шляхом теплопровідності а також конвекцією і випромінюванням. Кількість переданого тепла буде визначатися за формулою:

$$Q = k_n \cdot (t_{c1} - t_{c2}) \cdot F + c \cdot F \cdot [(T_{c1}/100)^4 - (T_{c2}/100)^4],$$

						Лист
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{або } Q = (k_{\text{и}} + \alpha_{\text{пр}}) \cdot F \cdot (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}),$$

де  $F$  – поверхня теплопередачі;

$t_{\text{c1}}, t_{\text{c2}}$  – температури стінок;

$\alpha_{\text{пр}}$  - коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням;

$k_{\text{и}}$  - коефіцієнт теплопередачі прошарку шляхом дотику.

Кількість переданого тепла шляхом дотику:

$$Q_{\text{д}} = (\lambda_{\text{ек}} / \delta) \cdot F \cdot (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}),$$

$\lambda_{\text{ек}} / \delta = \varepsilon_{\text{к}}$  – коефіцієнт конвекції.

Питомий тепловий потік через прошарку шляхом дотику

$$q_{\text{д}} = (\varepsilon_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{п}} / \delta + \alpha_{\text{пр}}) \cdot \Delta t_{\text{с}},$$

де  $\lambda_{\text{п}}$  - коефіцієнт теплопровідності повітря

$\delta$  – товщина повітряної прошарки

$\Delta t_{\text{с}} = (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}})$  – різниця температур між стінками.

Визначимо коефіцієнт конвекції за формулою:

$$\varepsilon_{\text{к}} = c \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n,$$

де  $\text{Gr}$  - критерій Грасгофа;

$\text{Pr}$  - критерій Прандтля;

при  $10^6 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^{10}$   $c = 0,4$ ,  $n = 0,2$ .

$$\text{Gr} = (\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot \Delta t_{\text{с}}) / \nu^2$$

де  $\beta = 1 / T_{\text{ср}}$  – коефіцієнт розширення;  $T_{\text{ср}}$  – середня температура повітря;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ; прискорення вільного падіння; визначальний розмір

коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря при

$\delta = 0,16 \text{ м}$  - визначальний розмір

$\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря при  $T_{\text{ср}}$ .

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначимо за формулою:

$$\alpha_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{ч}} \cdot C_{\text{о}} \cdot \Psi \cdot [(T_{\text{c1}}/100)^4 - (T_{\text{c2}}/100)^4] / (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}),$$

де  $\varepsilon_{\text{ч}}$  - наведений ступінь чорноти;

$C_{\text{о}} = 5,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  - коефіцієнт випромінюванням абсолютно чорного тіла;

$\Psi$  – коефіцієнт взаємного випромінювання.

$$\varepsilon_{\text{ч}} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) = 1 / (1/0,76 + 1/0,55 - 1) = 0,465,$$

						Лист
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $\varepsilon_1 = 0,76$ ,  $\varepsilon_2 = 0,55$  - наведені ступіні чорноти матеріала стінок.

Наявність між стінками холодильника екрану з металізованої плівки дозволяє зменшити променистий тепловий потік, як мінімум, вдвічі.

Питомий тепловий потік через повітряний прошарок з екраном визначимо за формулою:

$$q_e = (\varepsilon_k \cdot \lambda_{\text{п}} / \delta + \alpha_{\text{пр}} / 2) \cdot \Delta t_c.$$

Кількість тепла, яке пройде через огорожу, визначимо за формулою:

$$Q = q_e \cdot F,$$

де  $F$  – площа огоржи.

Визначимо тепловий потік через дах.

Зовнішня температура стінки

$$t_{c1} = t_{\text{зовн}} + \Delta t_{\text{сд}} = 32 + 14,9 = 47 \text{ }^\circ\text{C} = 320 \text{ K}.$$

Середня температура повітря

$$t_{\text{ср}} = (t_{c1} + t_{\text{кам}}) / 2 = (47 + 6) / 2 = 26,5 \text{ }^\circ\text{C} = (299,5 \text{ K}).$$

Різниця температур між стінками

$$\Delta t_c = (t_{c1} - t_{c2}) = 47 - 6 = 41 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ви значимо параметри повітря при  $t_{\text{ср}} = 26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ :

коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:  $\nu_{\text{п}} = 15,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

коефіцієнт теплопровідності:  $\lambda_{\text{п}} = 0,0265 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;

$Pr = 0,702$ .

Визначимо коефіцієнт конвекції

$$\varepsilon_k = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,4 \cdot (2,203 \cdot 10^7 \cdot 0,702)^{0,2} = 10,96,$$

де  $Gr = (\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot \Delta t_c) / \nu^2 = (1 \cdot 9,81 \cdot 0,16^3 \cdot 41) / (299,5 \cdot (15,8 \cdot 10^{-6})^2) = 2,203 \cdot 10^7$ .

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{пр}} &= \varepsilon_{\text{ч}} \cdot C_o \cdot \psi \cdot [(T_{c1}/100)^4 - (T_{c2}/100)^4] / (t_{c1} - t_{c2}) = \\ &= 0,465 \cdot 5,7 \cdot 0,402 \cdot [(320/100)^4 - (279/100)^4] / 41 = 1,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Питомий тепловий потік через дах

$$q_e = (\varepsilon_k \cdot \lambda_{\text{п}} / \delta + \alpha_{\text{пр}} / 2) \cdot \Delta t_c = (10,96 \cdot 0,0265 / 0,16 + 1,15 / 2) \cdot 41 = 98,0 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

Визначимо тепловий потік через дах

$$Q_{1д} = q_e \cdot F = 98 \cdot 24 = 2352 \text{ Вт}.$$

					КРБ.ХУКП.1.576-03.2.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		31

де  $F = 24 \text{ м}^2$  площа даху.

Визначимо тепловий потік через північну та південну стінки, які не схильні до сонячного опромінення. Для північної стінки  $\Delta t_{cc} = 0$ , а південна стінка розташована в тіні холодильної машини.

$$t_{c1} = 32 \text{ }^\circ\text{C} = 305 \text{ K}, t_{c2} = 6 \text{ }^\circ\text{C} = 279 \text{ K}.$$

$$t_{cp} = (t_{c1} + t_{кам}) / 2 = (32 + 6) / 2 = 19 \text{ }^\circ\text{C} = (292 \text{ K}),$$

$$\Delta t_c = (t_{c1} - t_{c2}) = 32 - 6 = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ви значимо параметри повітря при  $t_{cp} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\nu_{п} = 15,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{п} = 0,0258 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$Pr = 0,703.$$

Визначимо коефіцієнт конвекції:

$$\varepsilon_k = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,4 \cdot (1,59 \cdot 10^7 \cdot 0,703)^{0,2} = 10,27,$$

$$\text{де } Gr = (\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot \Delta t_c) / \nu^2 = (1 \cdot 9,81 \cdot 0,16^3 \cdot 26) / (15,0 \cdot 10^{-6})^2 = 1,59 \cdot 10^7.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\begin{aligned} \alpha_{пр} &= \varepsilon_{ч} \cdot C_o \cdot \psi \cdot [(T_{c1}/100)^4 - (T_{c2}/100)^4] / (t_{c1} - t_{c2}) = \\ &= 0,465 \cdot 5,7 \cdot 0,402 \cdot [(305/100)^4 - (279/100)^4] / 26 = 1,06 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Питомий тепловий потік через торцеві стіни

$$q_e = (\varepsilon_k \cdot \lambda_{п} / \delta + \alpha_{пр} / 2) \cdot \Delta t_c = (10,27 \cdot 0,0258 / 0,16 + 1,06 / 2) \cdot 26 = 56,8 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

Визначимо тепловий потік через торцеві стіни

$$Q_{тс} = q_e \cdot F = 56,8 \cdot 32 = 1818 \text{ Вт}.$$

де  $F = 32 \text{ м}^2$  площа стін.

Визначимо тепловий потік через західну стінку:

$$t_{c1} = t_{зовн} + \Delta t_{сзс} = 32 + 11,7 = 43,7 \text{ }^\circ\text{C} = 316,7 \text{ K}.$$

Середня температура повітря

$$t_{cp} = (t_{c1} + t_{кам}) / 2 = (43,7 + 6) / 2 = 24,85 \text{ }^\circ\text{C} = (297,85 \text{ K}).$$

Різниця температур між стінками

$$\Delta t_c = (t_{c1} - t_{c2}) = 43,7 - 6 = 37,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ви значимо параметри повітря при  $t_{cp} = 24,85 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\text{коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря: } \nu_{п} = 15,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

					КРБ.ХУКП.1.576-03.2.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		32

коефіцієнт теплопровідності:  $\lambda_{\text{п}}=0,0263 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

$Pr = 0,702$ .

Визначимо коефіцієнт конвекції

$$\varepsilon_{\text{к}} = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,4 \cdot (2,111 \cdot 10^7 \cdot 0,702)^{0,2} = 10,87,$$

$$\text{де } Gr = (\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot \Delta t_c) / \nu^2 = (1,9,81 \cdot 0,16^3 \cdot 37,7) / (297,85 \cdot (15,52 \cdot 10^{-6})^2) = 2,111 \cdot 10^7.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\alpha_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{ч}} \cdot C_o \cdot \psi \cdot [(T_{\text{c1}}/100)^4 - (T_{\text{c2}}/100)^4] / (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}) = 0,465 \cdot 5,7 \cdot 0,402 \cdot [(316,7/100)^4 - (279/100)^4] / 37,7 = 1,13 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Питомий тепловий потік через західну стінку

$$q_e = (\varepsilon_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{п}}/\delta + \alpha_{\text{пр}}/2) \cdot \Delta t_c = (10,87 \cdot 0,0263/0,16 + 1,13/2) \cdot 37,7 = 88,7 \text{ Вт/м}^2,$$

Визначимо тепловий потік через дах

$$Q_{\text{1зс}} = q_e \cdot F = 88,7 \cdot 24 = 2128 \text{ Вт}.$$

де  $F = 24 \text{ м}^2$  площа стінки.

Визначимо тепловий потік через східну стінку:

$$t_{\text{c1}} = t_{\text{зовн}} + \Delta t_{\text{сcc}} = 32 + 9,8 = 41,8 \text{ }^\circ\text{C} = 314,8 \text{ К}.$$

Середня температура повітря

$$t_{\text{ср}} = (t_{\text{c1}} + t_{\text{кам}}) / 2 = (41,8 + 6) / 2 = 23,9 \text{ }^\circ\text{C} = (296,9 \text{ К}).$$

Різниця температур між стінками

$$\Delta t_c = (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}) = 41,8 - 6 = 35,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ви значимо параметри повітря при  $t_{\text{ср}} = 23,9 \text{ }^\circ\text{C}$ :

коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:  $\nu_{\text{п}}=15,43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

коефіцієнт теплопровідності:  $\lambda_{\text{п}}=0,0262 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;

$Pr = 0,702$ .

Визначимо коефіцієнт конвекції

$$\varepsilon_{\text{к}} = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,4 \cdot (2,035 \cdot 10^7 \cdot 0,702)^{0,2} = 10,79,$$

$$\text{де } Gr = (\beta \cdot g \cdot \delta^3 \cdot \Delta t_c) / \nu^2 = (1,9,81 \cdot 0,16^3 \cdot 35,8) / (296,9 \cdot (15,43 \cdot 10^{-6})^2) = 2,035 \cdot 10^7.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\alpha_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{ч}} \cdot C_o \cdot \psi \cdot [(T_{\text{c1}}/100)^4 - (T_{\text{c2}}/100)^4] / (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}}) =$$

					КРБ.ХУКП.1.576-03.2.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$= 0,465 \cdot 5,7 \cdot 0,402 \cdot [(3148/100)^4 - (279/100)^4] / 35,8 = 1,12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Питомий тепловий потік через дах

$$q_e = (\epsilon_k \cdot \lambda_{\text{п}}/\delta + \alpha_{\text{пр}}/2) \cdot \Delta t_c = (10,79 \cdot 0,0262/0,16 + 1,12/2) \cdot 35,8 = 83,3 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

Визначимо тепловий потік через східну стінку

$$Q_{1\text{сх}} = q_e \cdot F = 83,3 \cdot 24 = 1999 \text{ Вт}.$$

де  $F = 24 \text{ м}^2$  площа стінки.

Визначимо тепловий потік від ґрунту визначимо за формулою:

$$Q_{1\text{гр}} = \lambda_{\text{гр}} \cdot P_x \cdot (t_{\text{зовн}} - t_{\text{вн}}) \cdot \ln(1 + b / 0,366\lambda_{\text{гр}}) =$$

$$= 0,93 \cdot 20 \cdot (32 - 6) \cdot \ln(1 + 4 / 0,366 \cdot 0,93) = 1231 \text{ Вт},$$

де  $\lambda_{\text{гр}} = 0,93 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  - коефіцієнт теплопровідності ґрунту;

$P_x = (4+6) \cdot 2 = 20 \text{ м}$  – периметр холодильника;

$b = 4 \text{ м}$  – ширина холодильника;

$t_{\text{зовн}} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура ґрунту;

$t_{\text{вн}} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура у камері.

Сумарні теплопритоки в камеру через огороження

$$Q_1 = Q_{1\text{д}} + Q_{1\text{тс}} + Q_{1\text{зс}} + Q_{1\text{схс}} + Q_{1\text{гр}} =$$

$$= 2352 + 1818 + 2128 + 1999 + 1231 = 9528 \text{ Вт}.$$

Таблиця 2. Теплопритоки через огорожі

Найменування огорожі	F, м <sup>2</sup>	$\alpha_{\text{пр}}, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	$t_{\text{к}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{н}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{пр}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t_c, \text{ }^\circ\text{C}$	$q_e, \text{кВт}/\text{м}^2$	$Q_{1i}, \text{кВт}$	$Q_1, \text{кВт}$
Стіна зовнішня північна	16	1,06	+6	32	26	-	26	56,8	0,909	9,528
Стіна зовнішня західна	24	1,13				11,7	37,7	88,7	2,128	
Стіна зовнішня східна	24	1,12				9,8	35,8	83,3	1,999	
Стіна зовнішня південна	16	1,06				-	26	56,8	0,909	
Дах	24	1,15				15	41	1,15	2,352	
Підлога (ґрунт)	24								1,231	

### Теплопритоки від холодильної обробки яблук.

$$Q_2 = Q_{2гр} + Q_{2т} = 14,444 + 1,073 = 15,517 \text{ кВт.}$$

де  $Q_{2гр}$  – теплоприток від яблук, кВт;

$Q_{2т}$  - теплоприток від тари, кВт;

$$Q_{2гр} = M_k \cdot \Delta h \cdot \frac{1000}{\tau \cdot 3600} = 20 \cdot 52 \cdot \frac{1000}{20 \cdot 3600} = 14,444 \text{ кВт}$$

де  $M_k = 20$  т добове надходження яблук у камері;

$\Delta h$  – різниця ентальпій яблук, що поступає на холодильну обробку при початковій температурі  $t_1 = 20$  °С -  $h_1 = 347$  кДж/кг і при середній за його обсягом кінцевій температурі  $t_2 = 6$  °С, для яблук  $h_2 = 295$  кДж/кг [6]:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 347 - 295 = 52 \text{ кДж/кг};$$

$\tau$  – час холодильної обробки яблук,  $\tau = 20$  год.

### Теплоприток від тари.

$$Q_{2т} = M_m \cdot C_m \cdot (t_1 - t_2) \cdot \frac{1000}{\tau \cdot 3600} = 2,4 \cdot 2,3 \cdot (20 - 6) \cdot \frac{1000}{20 \cdot 3600} = 1,073 \text{ кВт}$$

де  $M_m$  – масо тари,  $M_m = m_k \cdot p_k = 30 \cdot 80 = 2400$  кг = 2,4 т,

де  $m_k = 30$  кг – маса 1 контейнера;

$p_k = 80$  – кількість контейнерів;

$C_m = 2,3$  кДж/(кг·К) – теплоємність дерев'яної тари.

Визначимо кількість тепла, що виділяється у процесі дихання яблук

$$Q_3 = V_k \cdot (0,1 \cdot q_{над} + 0,9 \cdot q_{зб}) = 20 \cdot (0,1 \cdot 121 + 0,9 \cdot 37) = 908 \text{ Вт.}$$

де  $V_k = 20$  т – ємність камери;

$q_{над} = 121$  Вт/т,  $q_{зб} = 37$  Вт/т - тепловиділення яблук при температурах надходження та зберігання.

Теплопритоки від працюючих електродвигунів

Приймаємо кратність циркуляції повітря  $a = 20$  об/год.

Витрата повітря

$$V_{п} = V_k \cdot a = 96 \cdot 20 = 1920 \text{ м}^3.$$

$$Q_4 = 2 \cdot N_{ел} = 2 \cdot 700 = 1400 \text{ Вт.}$$

Сумарний тепловий потік

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 9528 + 15517 + 908 + 1400 = 27353 \text{ Вт.}$$

Теплове навантаження на камерне обладнання  $Q_o = 27,35 \text{ кВт.}$

Визначимо холодопродуктивність компресора

$$Q_o = k \cdot Q_{KM} / b = 1,05 \cdot 27,353 / 0,8 = 36,9 \text{ кВт.}$$

де  $k = 1,05$  - коефіцієнт втрат у трубопроводах та апаратах;

$b = 0,8$  - коефіцієнт робочого часу [6].

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		36

### 2.3. Розрахунок холодильного циклу та підбір компресора

Початкові дані:

Розрахункова холодопродуктивність компресора  $Q_0 = 36,9$  кВт.

Холодильний агент R290

Температура довкілля  $t_{\text{дов}} = 32$  °С

Температура у холодильнику  $t_{\text{кам}} = 6$  °С

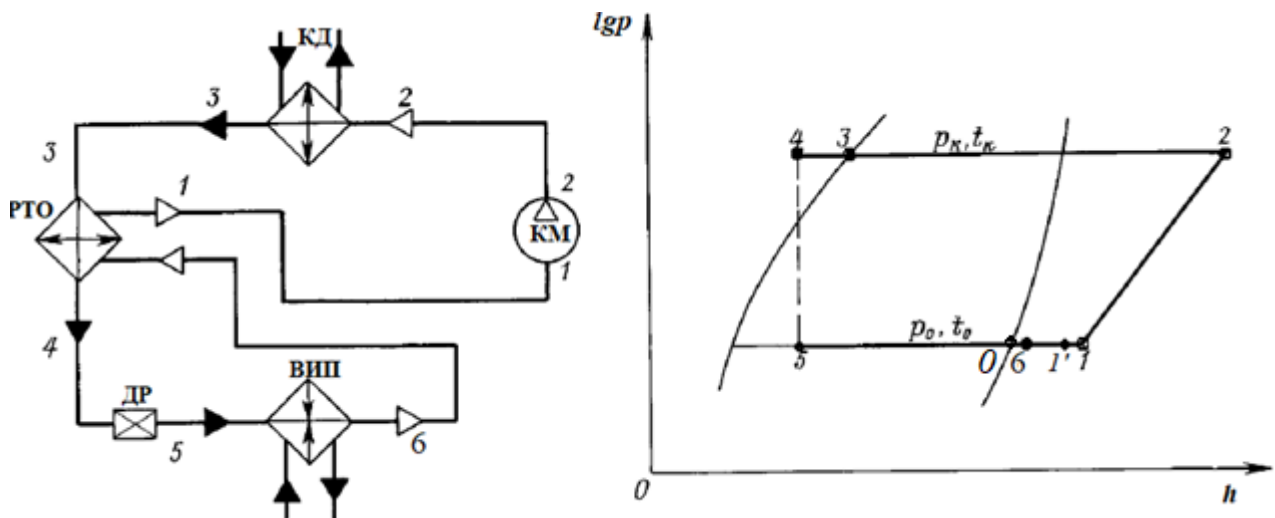


Рис. 9. Схема та цикл холодильної машини з регенеративним теплообмінником: КМ –компресор, КД – конденсатор, РТО - регенеративний теплообмінник, ДР - дросельний вентиль, ВИП – випарник.

Температура кипіння холодоагенту в випарнику  $t_0$  менше, чім температура у холодильнику на 7- 10 градусів, визначимо  $t_0$ :

$$t_0 = t_{\text{кам}} - 8 = 6 - 8 = -2 \text{ °С.}$$

Температура конденсації у повітряному конденсаторі  $t_k$  більше, чім температура навколишнього середовища на 10-15 градусів. Визначимо температуру конденсації:

$$t_k = t_{\text{дов}} + 10 = 32 + 10 = 42 \text{ °С.}$$

Приймаємо:

-перегрів парів холодоагенту у випарнику  $5$  °С, визначимо  $t_6$ :

$$t_6 = t_0 + 5 = -2 + 5 = 3 \text{ }^\circ\text{C}$$

-недорекуперацією на теплому кінці РТО 25 °С, тоді визначимо  $t_{1'}$ :

$$t_{1'} = t_3 - 25 = 45 - 25 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

-перегрів парів пропану у електродвигуну компресора 5 °С, визначимо  $t_1$ ;

$$t_1 = t_{1'} + 5 = 20 + 5 = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

З теплового балансу РТО визначимо ентальпію т. 4:

$$h_4 = h_3 - (h_{1'} - h_6) = 319,3 - (610,4 - 580) = 229 \text{ кДж/кг}.$$

Параметри вузлових точок циклу зведемо в таблицю 1.

Таблиця 3. Параметри вузлових точок холодильного циклу на R290.

$t_k = 45 \text{ }^\circ\text{C} \quad t_0 = -2 \text{ }^\circ\text{C}$								
Параметри	0	6	1'	1	2	3	4	5
p, МПа	0,443	0,443	0,443	0,443	1,531	1,531	1,531	0,443
t, °С	-2	3	20	25	75,3	45	34,3	-2
h, кДж/кг	571,2	580	610,4	619,5	686	319,3	289	289
v, м <sup>3</sup> /кг				0,117				

Питома масова холодопродуктивність:

$$q_0 = h_6 - h_5 = 580 - 289 = 291 \text{ кДж/кг}.$$

Питома адіабатна робота компресора

$$l_a = h_2 - h_1 = 686 - 619,5 = 66,5 \text{ кДж/кг}.$$

Питома об'ємна холодопродуктивність компресора

$$q_v = q_0 / v_1 = 291 / 0,117 = 2487 \text{ кДж/м}^3.$$

Питоме теплове навантаження на конденсатор

$$q_k = h_2 - h_3 = 686 - 319,3 = 366,7 \text{ кДж/кг}$$

Теоретичний коефіцієнт перетворення

$$COP_T = q_0 / l_a = 291 / 66,5 = 4,38.$$

Коефіцієнт подачі компресора

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda_w = 0,963 \cdot 0,796 = 0,776,$$

де  $\lambda_c$  – об'ємний коефіцієнт

$$\lambda_c = 1 - c \cdot \left[ \left( \frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] = 1 - 0,015 \cdot \left[ \left( \frac{1,531}{0,443} \right)^{\frac{1}{1}} - 1 \right] = 0,963,$$

де  $c = 0,015$  – відносна величина мертвого простору,

$m = 1$  – показник політропи розширення пропану з мертвого простору;

$\lambda_w$  – фиктивний коефіцієнт підігріву:

$$\lambda_w = \frac{T_0 + \theta}{\alpha \cdot T_k + b \cdot \theta} = \frac{271 + 27}{1,12 \cdot 318 + 0,5 \cdot 27} = 0,806,$$

де  $\alpha = 1,12$ ;  $b = 0,5$ ;

$$\theta = t_1 - t_0 = 25 + 2 = 27 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_0 = t_0 + 273 = -2 + 273 = 271 \text{ K};$$

$$T_k = t_k + 273 = 45 + 273 = 318 \text{ K}.$$

Масова витрата холодоагенту

$$M_a = Q_0 / q_0 = 36,9 / 291 = 0,127 \text{ кг/с}.$$

Дійсний об'єм парів, всмоктуваних компресором

$$V_\partial = M_a \cdot v_1 = 0,127 \cdot 0,117 = 0,0149 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Об'єм, описаний поршнями компресора в одиницю часу

$$V_h = V_\partial / \lambda = 0,0149 / 0,776 = 0,0192 \text{ м}^3/\text{с}$$

Адіабатна потужність компресора

$$N_a = M_a \cdot l_a = 0,127 \cdot 66,5 = 8,45 \text{ кВт}.$$

Індикаторний к.к.д. компресора

$$\eta_i = \lambda_w + b \cdot t_0 = 0,806 + 0,0025 \cdot (-2) = 0,801,$$

де  $b = 0,0025$  для вуглеводнів.

Індикаторна потужність компресора

$$N_i = N_a / \eta_i = 8,45 / 0,801 = 10,55 \text{ кВт}.$$

Потужність тертя

$$N_{тер} = V_h \cdot p_{cp} = 0,0192 \cdot 50 = 0,96 \text{ кВт},$$

де середній тиск тертя  $p_{cp} = 50 \text{ кПа}$  для R290.

Ефективна потужність компресора

$$N_e = N_i + N_{тер} = 10,55 + 0,96 = 11,5 \text{ кВт}.$$

Електрична потужність компресора

$$N_{ел} = N_e / \eta_{ел.дв} = 11,5 / 0,9 = 12,8 \text{ кВт},$$

де  $\eta_{ел.дв} = 0,9$  – ККД електродвигуна.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39

Ефективний  $COP_e$

$$COP_e = Q_0 / N_e = 36,9 / 11,5 = 3,21.$$

Електричний  $COP_{ел}$

$$COP_{ел} = Q_0 / N_{ел} = 36,9 / 12,8 = 2,88.$$

Ступінь термодинамічної досконалості циклу:

теоретична

$$\eta^T_{СТС} = COP_T / COP_{Карно} = 4,38 / 5,77 = 0,759 ,$$

де  $COP_{Карно}$  – коефіцієнт перетворення Карно

$$COP_{Карно} = T_0 / (T_k - T_0) = 271 / (318 - 271) = 5,77;$$

дійсна

$$\eta^D_{СТС} = COP_D / COP_{Карно} = 2,88 / 5,77 = 0,504.$$

Теплове навантаження на конденсатор

$$Q_k = Q_0 + N_i = 36,9 + 10,55 = 47,5 \text{ кВт.}$$

По каталогу підбираємо компресорно-конденсаторний агрегат з напівгерметичним компресором фірми Bitzer 4H-15.2.

Об'ємна продуктивність  $V_h = 0,0205 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Кількість циліндрів: 4.

Частота обертання валу компресора 1450 об/хв.

Робоча напруга: 380-420 В

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		40

## 2.4. Розрахунок повітряного конденсатора

Початкові дані:

Холодоагент R290.

Теплове навантаження на конденсатор  $Q_k = 47,5$  кВт.

Температура зовнішнього повітря -  $t_n = 32^\circ\text{C}$ .

Температура конденсації -  $t_k = 45^\circ\text{C}$ .

Повітряний конденсатор виконаний із мідних труб діаметром 16x1 мм з алюмінієвим пластинчастим ребром.

Товщина ребра -  $\delta_p = 0,5$  мм.

Крок ребер -  $S_p = 4,5$  мм.

Крок труб по фронту і по ходу повітря -  $S_1 = S_2 = 40$  мм.

Компоновка пучка труб – шахове.

Температура повітря на вході в апарат -  $t_{вх} = t_n = 32^\circ\text{C}$ .

Приймаємо:

-довжина трубки конденсатора  $l = 1,5$  м.

-кількість рядів труб за висотою  $n_1 = 24$

Висота апарату:

$$H = n_1 \cdot S_1 = 24 \cdot 0,04 = 0,96 \text{ м.}$$

Приймаємо нагрів повітря у конденсаторі  $5$  град.

Температура повітря на виході з конденсатора

$$t_{вих} = t_{нх} = 32 + 5 = 37^\circ\text{C}.$$

Середньологаріфмічний температурний натиск:

$$\theta_m = \frac{t_{вх} - t_{нх}}{\ln \frac{t_k - t_{нх}}{t_k - t_{вх}}} = \frac{37 - 32}{\ln \frac{45 - 32}{45 - 37}} = 10,3^\circ\text{C}$$

Геометричні характеристики обрешеченої труби:

Площа внутрішньої теплопередавальної поверхні труби завдовжки 1 м: :

$$F_{вн1} = \pi \cdot d_{вн} \cdot l = \pi \cdot 0,014 = 0,04396 \text{ м}^2.$$

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		41

Зовнішня площа теплопередавальної поверхні гладкої труби завдовжки 1 метр:

$$F_{згл1} = \pi \cdot d_{зовн} = \pi \cdot 0,016 = 0,05024 \text{ м}^2.$$

Еквівалентний діаметр повітряного каналу:

$$d_{\text{екв}} = \frac{2 \cdot (S_1 - d_{\text{зовн}}) \cdot (S_p - \delta_p)}{(S_1 - d_{\text{зовн}}) + (S_p - \delta_p) \cdot S_p} =$$

$$= \frac{2 \cdot (0,04 - 0,016) \cdot (0,0045 - 0,0005)}{(0,04 - 0,016) + (0,0045 - 0,0005) \cdot 0,004} = 0,008 \text{ м}^2$$

Зовнішня поверхня ребер і міжреберних ділянок труби завдовжки 1 метр:

$$F_{\text{ор}} = F_p + F_{\text{мр}} = \frac{1}{S_p} \cdot [2 \cdot (S^2 - \pi \frac{d_{\text{зовн}}^2}{4}) + (S_p - \delta_p) \cdot \pi \cdot d_{\text{зовн}}] =$$

$$= \frac{1}{0,0045} \cdot [2 \cdot (0,04^2 - 0,785 \cdot 0,016^2) + (0,0045 - 0,0005) \cdot 3,14 \cdot 0,016] =$$

$$= 0,6218 + 0,0447 = 0,6665 \frac{\text{м}^2}{\text{м}}$$

Коефіцієнт обрешення:

$$\beta = F_{\text{зов}} / F_{\text{вн}} = 0,6665 / 0,04396 = 15,16.$$

Середня температура повітря в апараті

$$t_n = t_k - \Theta_m = 45 - 10,3 = 34,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Визначаємо параметри повітря при середній температурі:

коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:  $\nu_{\text{п}} = 16,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

коефіцієнт теплопровідності:  $\lambda_{\text{п}} = 0,0272 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;

щільність:  $\rho_{\text{п}} = 1,131 \text{ кг/м}^3$ ;

теплоємність сухого повітря:  $C_p' = 1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

теплоємність вологого повітря:

$$C_p = C_p' + 1,89 \cdot d = 1,005 + 1,89 \cdot 0,0204 = 1,044 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$$

де  $d = d_{\text{нас}} \cdot \varphi = 37,05 \cdot 0,55 = 20,4 \text{ г/кг}$  – вологовміст повітря при  $t_n = 34,7 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\varphi = 55\%$ ,  $d_{\text{нас}} = 37,05 \text{ г/кг}$  - вологовміст насиченого повітря при  $t_n = 34,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Об'ємна витрата повітря через конденсатор:

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$V_n = \frac{Q_K}{c_p (t_{вих} - t_{ex}) \rho_n} = \frac{47,5}{1,044 \cdot 5 \cdot 1,148} = 7,926 \frac{M^3}{c}$$

Живий переріз конденсатора:

$$F_{жс} = \frac{L \cdot H (S_2 - d_{зовн}) (S_p - \delta_p)}{S_2 \cdot S_p} = \frac{1,5 \cdot 0,96 (0,04 - 0,016) (0,0045 - 0,0005)}{0,04 \cdot 0,0045} = 0,768 m^2$$

Швидкість повітря у живому перерізі

$$w = V_n / F_{жс} = 7,926 / 0,768 = 10,3 \text{ м/с.}$$

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{екв}}{\nu_g} = \frac{10,3 \cdot 0,008}{16,48 \cdot 10^{-6}} = 5000$$

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зовнішньої поверхні:

$$\begin{aligned} \alpha_{пзовн} &= 0,178 \cdot \frac{\lambda_g}{d_{екв}} \cdot Re^{0,6} \cdot \left( \frac{L}{d_{екв}} \right)^{-0,14} = \\ &= 0,178 \cdot \frac{0,0272}{0,008} \cdot 5000^{0,6} \cdot \left( \frac{40}{8} \right)^{-0,14} = 80,1 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

Коефіцієнт ефективності ребра:

$$E = \frac{th(m \cdot h')}{m \cdot h'} = \frac{th(39,1 \cdot 0,03084)}{39,1 \cdot 0,03084} = \frac{th(1,121)}{1,121} = \frac{0,811}{1,121} = 0,723$$

де  $h'$  - умовна висота ребра, м:

$$\begin{aligned} h' &= \frac{d_{зовн}}{2} \cdot (\rho - 1) \cdot (1 + 0,805 \cdot \ln \rho) = \\ &= \frac{0,016}{2} \cdot (2,875 - 1) \cdot (1 + 0,805 \cdot \ln 2,875) = 0,03084 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\rho = 1,15 \cdot \frac{S_1}{d_{зовн}} = 1,15 \cdot \frac{40}{16} = 2,875$$

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_g}{\lambda_p \cdot \delta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 80,1}{210 \cdot 0,0005}} = 39,1$$

де  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу ребра,  $\lambda_p = 210 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

Коефіцієнт тепловіддачі, приведений до внутрішньої поверхні труби:

$$\alpha_{n_{вн}} = \alpha_{пзовн} \cdot \left( \frac{F_p}{F_{вн}} \cdot E + \frac{F_{мп}}{F_{вн}} \right) = 80,1 \cdot \left( \frac{0,6218}{0,04346} \cdot 0,723 + \frac{0,0447}{0,04346} \right) = 911 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Щільність теплового потоку від внутрішньої поверхні стінки труби до повітря

$$q_n = \alpha_{пвн} \cdot \theta_n = 911 \cdot \theta_n, \text{ Вт/м}^2$$

де  $\theta_n = t_{ст} - t_n$  - температурний натиск між стінкою труби і повітрям.

Щільність теплового потоку від пропану до внутрішньої поверхні труби:

$$q_a = \alpha_a \cdot \theta_a = 3385 \cdot \theta_a^{-0,25} \cdot \theta_a = 3474 \cdot \theta_a^{0,75}, \text{ Вт/м}^2,$$

де  $\alpha_a$  коефіцієнт тепловіддачі від пропану, що конденсується, до стінки труби:

$$\alpha_a = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu \cdot \theta_a \cdot d_{вн}}} = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{9,81 \cdot 348 \cdot 490^2 \cdot 0,105^3 \cdot 10^3}{1,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,014 \cdot \theta_a}} = 3474 \cdot \theta_a^{-1/4}$$

де параметри R290 при  $t_k=45^\circ\text{C}$ :

$r=348$  кДж/кг – питома теплота паротворення ;

$\rho=489$  кг/м<sup>3</sup> – щільність рідкого R290;

$\mu=1,25 \cdot 10^{-4}$  Па·с – коефіцієнт динамічної в'язкості; рідкого R290

$\lambda=0,105$  Вт/м·К – коефіцієнт теплопровідності рідкого R290.

Для визначення густини теплового потоку в конденсаторі графічно вирішимо систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} q_a = 3474 \cdot \theta_a^{0,75} \\ q_n = 911 \cdot \theta_n \end{cases}$$

Результати розрахунку зведемо до таблиці 5.

Таблиця 4. Розрахунок щільності теплового потоку.

$\theta, \text{ град}$	0,5	1	2	2,5	2,7	3	10
$q_n = 911 \cdot \theta_n$	456	911	1822	-	-	-	9110
$q_a = 3474 \cdot \theta_a^{0,75}$	2066	3474	5843	6907	7317	7919	-

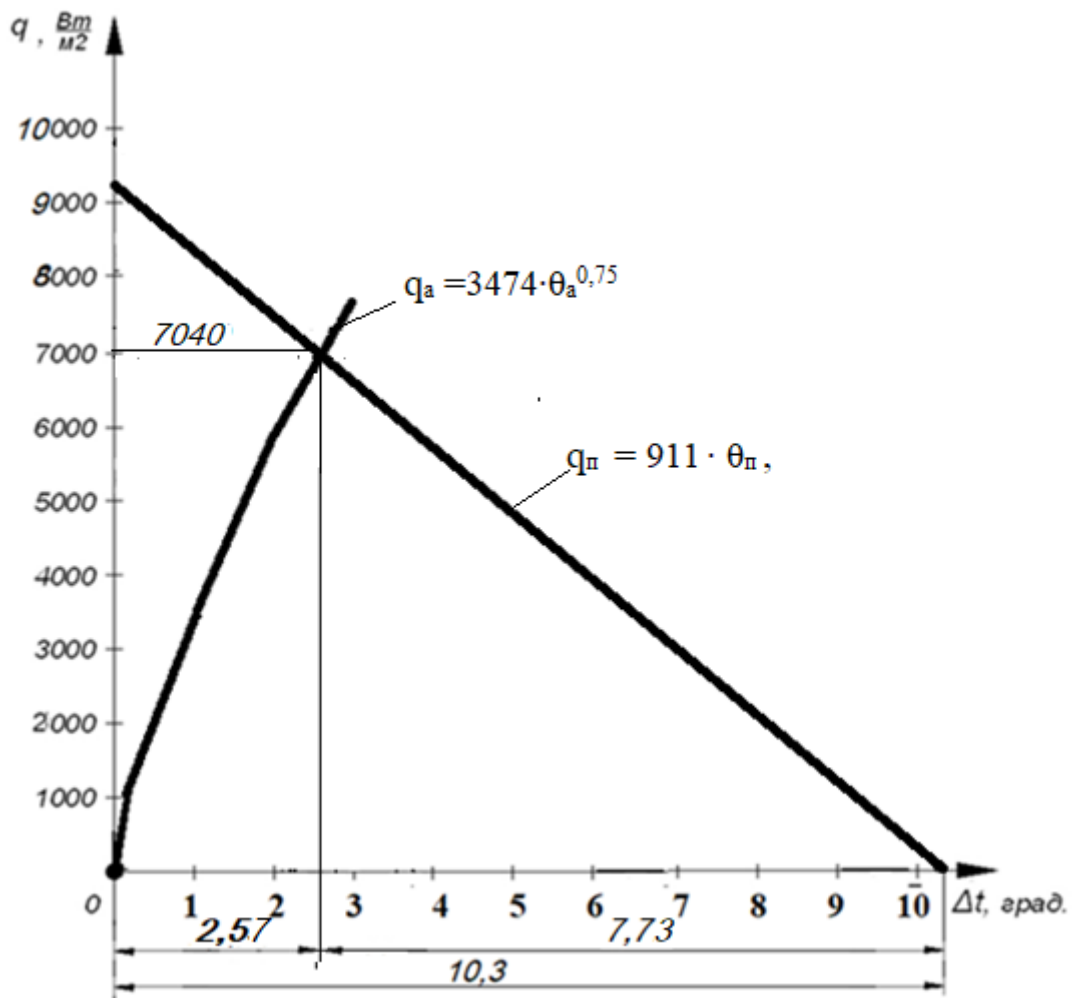


Рис. 10. Розрахунок щільності теплового потоку в повітряному конденсаторі

Точка перетину графіків побудованих в інтервалі температур, рівному середньологарифмічному температурному натиску в конденсаторі  $\theta_m=10,3^\circ\text{C}$ , дає значення щільності теплового потоку в конденсаторі:  $q_k=7040 \text{ Вт/м}^2$  при температурних напорах з боку повітря  $\theta_n=7,73^\circ\text{C}$  і з боку агента  $\theta_a=2,57^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт тепловіддачі пропану

$$\alpha_a = q_{\text{вн}} / \theta_a = 7040 / 2,57 = 2740 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнт теплопередачі віднесений до внутрішньої поверхні труби:

$$k_{\text{вн}} = q_{\text{вн}} / \theta_m = 7040 / 10,3 = 683,5 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнт теплопередачі віднесений до зовнішньої поверхні труби:

$$k_{\text{зовн}} = k_{\text{вн}} / \beta = 683,5 / 15,16 = 45,1 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Площа зовнішньої поверхні конденсатора:

$$F_{\text{зовн}} = Q_k \cdot \beta / q_{\text{вн}} = 47500 \cdot 15,16 / 7040 = 102,3 \text{ м}^2.$$

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		45

Загальна довжина труб в конденсаторі:

$$L = F_{\text{зовн}} / F_{\text{зовн1}} = 102,3 / 0,6665 = 153,5,0 \text{ м}^2.$$

Довжина труб в одному ряду:

$$L_p = l \cdot n_1 = 1,5 \cdot 24 = 36 \text{ м.}$$

де кількість рядів труб за висотою  $n_1 = 24$  труби завдовжки 1,6 м кожна.

Число рядів труб по ходу повітря:

$$n_2 = L / L_p = 153,5/36 = 4,26 \text{ рядів.}$$

З урахуванням запасу теплообмінної поверхні приймається  $n_2=5$ .

Аеродинамічний опір шахового пучка труб з пластинчастими ребрами:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 0,233 \cdot n_2 \cdot (\omega_v)^{1,8} \cdot \left( \frac{S_{\text{тр}}}{S_p - \delta_p} \right)^{0,42} = \\ &= 0,233 \cdot 5 \cdot (10,3)^{1,8} \cdot \left( \frac{0,04}{0,0045 - 0,0005} \right)^{0,42} = 204 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Потужність, яку споживає вентилятор

$$N_{\text{вент}} = \frac{V_{\text{п}} \cdot \Delta P}{\eta_v} = \frac{7,926 \cdot 204}{0,74 \cdot 1000} = 0,64 \text{ кВт,}$$

де  $\eta_v$  – електричний ККД вентилятора, приймаємо  $\eta_v=0,74$  [11].

Вибираємо повітряний конденсатор KFL ELK 46 з характеристиками:

- Потужність охолодження: 47,41 кВт
- Кількість вентиляторів: 2.
- Діаметр вентилятора: 500 мм.
- Площа поверхні теплообміну: 131 м<sup>2</sup>.
- Витрата повітря: 19 000 м<sup>3</sup>/год.
- Напор  $\Delta P=220$  Па.

## 2.5. Розрахунок повітроохолоджувача

Вихідні дані:

Температура повітря в тимчасовому холодильнику  $t_{\text{кам}} = + 6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура кипіння пропану  $t_0 = -2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура повітря на вході у повітроохолоджувач (ПО)  $t_{\text{вх}} = + 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура повітря на виході з ПО  $t_{\text{вих}} = + 6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Теплове навантаження на ПО  $Q_o = 27,35 \text{ кВт}$

Повітроохолоджувач представляє собою оребрену батарею виготовлену із мідних труб  $d_n \times \delta = 16 \times 1 \text{ мм}$ , які розташовані коридорно з алюмінієвим пластинчастим оребренням.

Крок труб;

по фронту  $S_1 = 0,04 \text{ м}$ ;

по руху повітря  $S_2 = 0,04 \text{ м}$ .

товщина ребра  $\delta_p = 0,001 \text{ м}$ ;

крок ребер: перші 4 ряди мають  $S'_p = 0,015 \text{ м}$ , а всі останні  $S_p = 0,01 \text{ м}$ .

Кількість труб по висоті ПО  $n_1 = 14$ .

Довжина оребреної труби  $l = 1,8 \text{ м}$ .

Процес охолодження повітря в повітроохолоджувачі зображений в  $d - h$  діаграмі на рис. 7.1.

Середня температура повітря у ПО

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{10 + 6}{2} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Фізичні параметри повітря при  $t_{cp} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ :

коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:  $\nu_n = 13,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

коефіцієнт теплопровідності:  $\lambda_n = 0,0249 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;

щільність:  $\rho_n = 1,259 \text{ кг/м}^3$ ;

Середньологаріфмічний температурний натиск:

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$\theta_m = \frac{t_{ex} - t_{вих}}{\ln \frac{t_{ex} - t_o}{t_{вих} - t_o}} = \frac{10 - 6}{\ln \frac{10 + 2}{6 + 2}} = 9,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

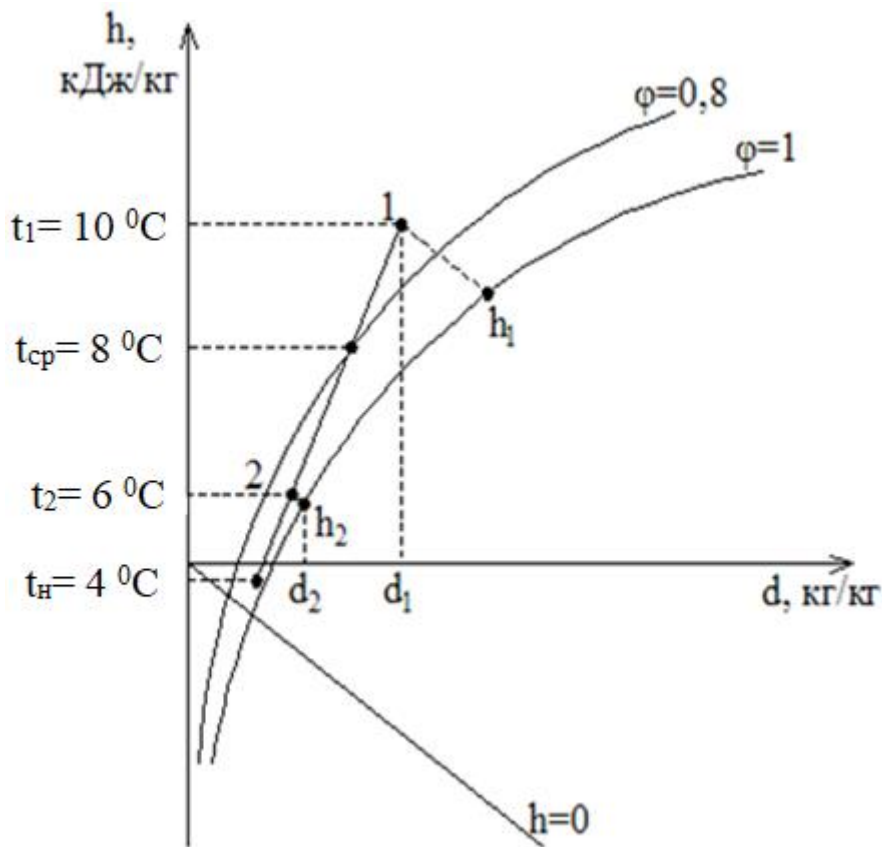


Рис. 11. Процес охолодження повітря у повітроохолоджувачі

Приймаємо, що температура поверхні ПО

$$t_{\text{н}} = t_0 + 6 = -2 + 6 = 4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Масова витрата повітря через повітроохолоджувач

$$M_{\text{п}} = \frac{Q_0^*}{h_1 - h_2} = \frac{27,35}{25,2 - 19,5} = 4,76 \text{ кг/с},$$

де  $h_1 = 25,2$  кДж/кг при  $t_1 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $h_2 = 19,5$  кДж/кг при  $t_2 = 6 \text{ } ^\circ\text{C}$  – знаходиться по  $d - h$  діаграмі.

Об'ємна кількість повітря, яка рухається через повітроохолоджувач

$$V_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{6,36}{1,259} = 3,81 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Коефіцієнт вологовипадіння

$$\xi = 1 + 2880 \cdot \frac{d_1 - d_2}{t_1 - t_2} = 1 + 2880 \cdot \frac{(6,0 - 5,5) \cdot 10^{-3}}{10 - 6} = 1,36,$$

де  $d_1 = 6,0$  г/кг при  $t_1 = 10$  °С;  $d_2 = 5,5$  г/кг при  $t_2 = 6$  °С – знаходиться по d – h діаграмі

Визначимо площу зовнішньої поверхні теплообмінника 1 метра довжини оребреної труби

Поверхня ребер 1 м труби:

перших 4 рядів з кроком ребер  $S'_p = 0,015$  м:

$$F'_p = 2 \cdot (S_1 \cdot S_2 - 0,785 \cdot d_n^2) \cdot \frac{1}{S_p} = 2 \cdot (0,04 \cdot 0,04 - 0,785 \cdot 0,016^2) \cdot \frac{1}{0,015} = 0,187 \text{ м}^2$$

для наступних рядів з  $S_p = 0,01$  м:

$$F_p = 2 \cdot (S_1 \cdot S_2 - 0,785 \cdot d_n^2) \cdot \frac{1}{S_p} = 2 \cdot (0,04 \cdot 0,04 - 0,785 \cdot 0,016^2) \cdot \frac{1}{0,01} = 0,280 \text{ м}^2$$

Зовнішня, вільна від ребер поверхня 1 м труби: :

$$F'_{mp} = \pi \cdot d_n \cdot \left(1 - \frac{\delta_p}{S_p}\right) = 3,14 \cdot 0,016 \cdot \left(1 - \frac{0,001}{0,015}\right) = 0,0449 \text{ м}^2$$

$$F_{mp} = \pi \cdot d_n \cdot \left(1 - \frac{\delta_p}{S_p}\right) = 3,14 \cdot 0,016 \cdot \left(1 - \frac{0,001}{0,01}\right) = 0,0452 \text{ м}^2$$

Повна поверхня 1 м оребреної трубки:

$$F'_{op} = F'_p + F'_{mp} = 0,187 + 0,0449 = 0,232 \text{ м}^2$$

$$F_{op} = F_p + F_{mp} = 0,28 + 0,0452 = 0,3252 \text{ м}^2$$

Внутрішня поверхня 1 м труби:

$$F_{вн} = \pi \cdot d_{вн} = 3,14 \cdot 0,014 = 0,04396 \text{ м}^2$$

Коефіцієнт оребріння:

$$\beta = \frac{F_{op}}{F_{вн}} = \frac{0,3252}{0,04396} = 7,41.$$

Площа живого перерізу ПО:

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		49

$$F_{\text{жс}} = F_{\text{фр}} - (F_{\text{тр}} + F_{\text{р}}) = 1,01 - (0,363 + 0,101) = 0,546 \text{ м}^2,$$

де  $F_{\text{фр}}$  - площа фронтального перерізу ПО

$$F_{\text{фр}} = L \cdot H = 1,8 \cdot 0,56 = 1,01 \text{ м}^2,$$

де  $H = S_1 \cdot n_1 = 0,04 \cdot 14 = 0,56 \text{ м}$  – висота трубного пучка ПО

Площа фронтального перерізу, зайнятого міжреберними ділянками труб

$$F_{\text{тр}} = d_{\text{н}} \cdot n_1 \cdot (1 - \delta_{\text{р}} \cdot n_{\text{р}}) = 0,016 \cdot 14 \cdot (1,8 - 0,001 \cdot 180) = 0,363 \text{ м}^2,$$

де  $n_{\text{р}}$  кількість ребер на 1 трубі

$$n_{\text{р}} = \frac{1}{S_{\text{р}}} = \frac{1,8}{0,01} = 180 \text{ (шт.)}$$

Площа фронтального перерізу, зайнятого ребрами

$$F_{\text{р}} = n_1 \cdot n_{\text{р}} \cdot S_1 \cdot \delta_{\text{р}} = 14 \cdot 180 \cdot 0,04 \cdot 0,001 = 0,101 \text{ м}^2.$$

Швидкість повітря в живому перетині ПО

$$\omega_{\text{в}} = \frac{V_{\text{в}}}{F_{\text{жс}}} = \frac{3,81}{0,546} = 6,98 \text{ м/с.}$$

Еквівалентний діаметр умовного каналу, утвореного рядами труб і ребрами:

$$d_{\text{ек}} = \frac{2 \cdot (S_1 - d_{\text{н}}) \cdot (S_{\text{р}} - \delta_{\text{р}})}{(S_1 - d_{\text{н}}) + (S_{\text{р}} - \delta_{\text{р}})} = \frac{2 \cdot (0,04 - 0,016) \cdot (0,01 - 0,001)}{(0,04 - 0,016) + (0,01 - 0,001)} = 0,0131 \text{ м.}$$

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\text{ек}}}{\nu_{\text{в}}} = \frac{6,98 \cdot 0,0131}{13,94 \cdot 10^{-6}} = 6560$$

Критерій Нусельта

$$\begin{aligned} Nu &= C \cdot C_z \cdot C_s \left( \frac{d_{\text{н}}}{S_{\text{р}}} \right)^{-0,54} \cdot \left( \frac{h_{\text{р}}}{S_{\text{р}}} \right)^{-0,14} \cdot Re^n \cdot K = \\ &= 0,105 \left( \frac{0,016}{0,01} \right)^{-0,54} \cdot \left( \frac{0,012}{0,01} \right)^{-0,14} \cdot 6560^{0,72} \cdot 0,92 = 40,9, \end{aligned}$$

де  $C = 0,105$ ;  $n = 0,72$  – для коридорного пучка;

$C_z = 1$ , так як  $n_2 = 8 > 4$

						Лист
						50
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$C_s=1$ , так як  $S_1 / d_n = 40/16=2,5>2$ ;

$h_p=(S_1 - d_n)/2=(40-16)/2=12$  мм;

$K=0,92$  – для трубок з квадратними ребрами.

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі від ребра і повітря

$$\alpha'_e = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d_3} = \frac{40,9 \cdot 0,0249}{0,0131} = 77,76 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коефіцієнт тепловіддачі з урахуванням вологовипадання

$$\alpha'_e = \alpha_e \cdot \xi = 77,76 \cdot 1,36 = 105,8 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коефіцієнт ефективності ребра

$$E_p = \frac{\text{th}(m \cdot h')}{m \cdot h'} = \frac{\text{th}(0,651)}{0,651} = 0,571/0,651 = 0,877.$$

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_B}{\lambda_p \cdot \delta_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 105,8}{210 \cdot 0,001}} = 31,74,$$

де  $\lambda_p=210$  (Вт/(м·К)) – питома теплопровідність алюмінію..

Умовна висота ребра

$$h' = 0,5 \cdot d_n \cdot (\rho - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln \rho) = \\ = 0,5 \cdot 0,016 \cdot (2,875 - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln 2,875) = 0,0205 \text{ м}$$

де 
$$\rho = 1,15 \cdot \frac{S_1}{d_n} = 1,15 \cdot \frac{0,04}{0,016} = 2,875;$$

$$m \cdot h' = 31,74 \cdot 0,0205 = 0,651.$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до всієї зовнішньої поверхні

$$\alpha_{пр} = \alpha'_e \cdot \left( \frac{F_p}{F_{оп}} \cdot E_p + \frac{F_{мп}}{F_{оп}} \right) = 105,8 \cdot \left( \frac{0,28}{0,3252} \cdot 0,877 + \frac{0,0452}{0,3252} \right) = 94,6 \text{ (Вт/(м}^2 \cdot \text{К))} \quad (7.27)$$

Коефіцієнт тепловіддачі R290, який кипить в трубах, визначимо за формулою Бо-П'єра [1]

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		51

$$\alpha_0 = B \cdot q_{F_{\text{вн}}}^{0,4} \cdot (\omega \cdot \rho)^{0,4} \cdot d_{\text{вн}}^{-0,6} \cdot 10^3 =$$

$$= 0,0064 \cdot 3,136^{0,4} \cdot 58,96^{0,4} \cdot 0,014^{-0,6} \cdot 10^3 = 576 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де 
$$(\omega \cdot \rho) = \frac{M_a \cdot 4}{z \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{0,127 \cdot 4}{10 \cdot 3,14 \cdot 0,014^2} = 82,54 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$$

$M_a = 0,127$  кг/с – масова витрата R290 через повітроохолоджувач;

$B = 0,0064$  [1]

Питоме теплове навантаження, яке віднесене до внутрішньої теплопередаючої поверхні

$$q_{F_{\text{вн}}} = \alpha'_n \cdot (t_n - t_n) \cdot \beta = 105,8 \cdot (8 - 4) \cdot 7,41 = 3136 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Коефіцієнт теплопередачі повітроохолоджувача без урахування термічного опору інею та стінки труби

$$k_n = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{нр оп}}} + \frac{\beta}{\alpha_0}} = \frac{1}{\frac{1}{94,6} + \frac{7,41}{576}} = 42,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Питоме теплове навантаження, яке віднесене до зовнішньої теплопередаючої поверхні

$$q_{F_{\text{зовн}}} = k \cdot (t_n - t_0) = 42,67 \cdot (8 + 2) = 426,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Прийнята різниця температур між повітрям та поверхнею ПО

$$\Delta t_1 = t_n - t_{\text{нн}} = 8 - 4 = 4 \text{ град.}$$

Розрахункова різниця температур між повітрям та поверхнею ПО

$$\Delta t_2 = \frac{q_{F_n}}{\alpha'_e} = \frac{426,7}{105,8} = 4,03 \text{ град}$$

Відносна похибка, що у межах допустимих норм

$$\Delta = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot 100\% = \frac{4,03 - 4}{4} \cdot 100 = 0,75\%$$

Умова  $\Delta < 10\%$  виконується

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		52

Площа зовнішньої поверхні повітроохолоджувача

$$F_{\text{зовн}} = \frac{Q_0}{q_{F_{\text{зовн}}}} = \frac{27350}{426,7} = 64,1 \text{ м}^2$$

Довжина труб ПО

$$L = F_{\text{зовн}} / F_{\text{зовн1}} = 64,1 / 0,3252 = 197,1 \text{ м.}$$

Кількість труб по руху повітря

$$n_2 = \frac{L}{n_1 \cdot l} = \frac{197,1}{14 \cdot 1,8} = 7,82$$

З урахуванням запасу 22% теплообмінної поверхні повітроохолоджувача  
приймаємо  $n_2 = 10$ .

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		53

## 2.6. Розрахунок діаметрів трубопроводів і підбір допоміжного обладнання

Визначення діаметра трубопроводу для рідкого холодильного агента.

Для обчислення внутрішнього діаметра трубопроводу, що транспортує рідкий холодильний агент, скористаємось наступним виразом:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot M}{\rho \cdot V \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,127}{478,5 \cdot 1 \cdot 3,14}} = 0,0184 \text{ м},$$

де:  $M = 0,127$  кг/с – масова витрата холодильного агента,

$\rho = 478,5$  кг/м<sup>3</sup> – густина рідкого пропана при тиску  $p = 1,531$  МПа та температурі  $t = 34,3$  °С;

$V = 1$  м/с – обрана швидкість руху рідкого пропана (рекомендований діапазон: 1–1,25 м/с).

Таким чином, доцільно застосувати трубопровід з умовним проходом  $D_y = 20$  мм.

Визначення діаметра всмоктуючого трубопроводу

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot M}{\rho \cdot V \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,127}{8,5 \cdot 8 \cdot 3,14}} = 0,0488 \text{ м},$$

де для ділянки, де агент знаходиться у пароподібному стані (всмоктування), рекомендована швидкість становить 8–12 м/с, приймаємо  $V = 8$  м/с;

$\rho = 8,5$  кг/м<sup>3</sup> – густина пари пропану при тиску  $p = 0,443$  МПа та температурі  $t = 25$  °С.

Вибираємо трубопровід з умовним діаметром  $D_y = 50$  мм.

Розрахунок діаметра трубопроводу на нагнітанні.

Для нагнітаючої частини системи рекомендована швидкість пари холодоагенту становить 10–18 м/с, приймаємо  $V = 12$  м/с.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot M}{\rho \cdot V \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,127}{28,2 \cdot 10 \cdot 3,14}} = 0,0240 \text{ м},$$

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		54

де  $\rho = 28,2 \text{ кг/м}^3$  – густина пари пропану при тиску  $p = 1,531 \text{ МПа}$  та температурі  $t_2 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Приймається трубопровід з умовним проходом  $D_y = 25 \text{ мм}$ .

Розрахунок об'єму лінійного ресивера

Об'єм ресивера визначається за формулою:

$$V_{\text{др}} = 0,6 \cdot 1,2 \cdot V_{\text{по}},$$

де: 0,6 – коефіцієнт допустимого заповнення ресивера,

1,2 – коефіцієнт запасу,

$V_{\text{по}}$  – внутрішній об'єм теплообмінних труб приладів охолодження, який обчислюється за формулою:

$$V_{\text{по}} = L_{\text{тр}} \cdot 0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2 = 252 \cdot 0,785 \cdot 0,014^2 = 0,03877 \text{ м}^3.$$

де  $L_{\text{тр}}$  – сумарна довжина труб повітроохолоджувача:

$$L_{\text{тр}} = n_1 \cdot n_2 \cdot l = 14 \cdot 10 \cdot 1,8 = 252 \text{ м},$$

де  $n_1 = 14$  – кількість труб у вертикальному ряду;

$n_2 = 10$  – кількість труб у горизонтальному ряду;

$l = 1,8 \text{ м}$  – довжина однієї труби.

Визначимо об'єм ресивера

$$V_{\text{др}} = 0,6 \cdot 1,2 \cdot 0,03877 = 0,0279 \text{ м}^3.$$

Вибираємо ресивер об'ємом 28 літрів.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		55

## РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

### Токсичність і особливості безпеки при використанні пропану (R-290).

У проекті тимчасового холодильника як робоча речовина (холодоагент) використовується пропан (R-290) — природний вуглеводневий холодоагент, що набуває все більшого поширення у холодильній техніці завдяки своїй високій енергоефективності, доступності та низькому впливу на довкілля.

Пропан характеризується низькою токсичністю, що підтверджено його віднесенням до класу A3 за класифікацією ASHRAE:

- A — низька токсичність,
- 3 — висока займистість.

#### Вплив на організм

Пропан не має виражених токсичних властивостей при короткочасному вдиханні в низьких концентраціях, і не викликає хронічних чи кумулятивних ефектів.

Гранично допустима концентрація (ГДК) пропану в повітрі робочої зони, згідно з [ДСП 201-97], становить 1000 мг/м<sup>3</sup>. Проте при витокі у замкнених просторах він може витіснити кисень, створюючи ризик кисневого голодування (гіпоксії).

Симптоми впливу високих концентрацій пропану включають:

- запаморочення,
- головний біль,
- дезорієнтацію,
- у важких випадках — втрата свідомості.

#### Основні ризики

Найбільшу небезпеку при використанні пропану становить його висока займистість і вибухонебезпечність:

- нижня межа вибуховості пропану в повітрі – 2,1 %, верхня – 9,5 % за об'ємом;

									Лист
									56
Зм.	Лист	№ докум .	Підпис	Дата					

- температура спалаху –  $-104^{\circ}\text{C}$ , що робить його небезпечним при витокі поблизу відкритого полум'я чи електроіскри.

#### Заходи безпеки

З метою захисту персоналу й запобігання надзвичайним ситуаціям передбачено:

- використання герметичного обладнання та фітінгів, сертифікованих для R-290;

- організація примусової вентиляції у зоні розміщення холодильника;

- встановлення газоаналізаторів (датчиків витокі пропану) з візуальною та звуковою сигналізацією;

- електрообладнання в місцях можливого скупчення парів має бути виконане у вибухозахищеному виконанні;

- розміщення вогнегасників, придатних для гасіння займистих газів (наприклад, вуглекислотні або порошкові);

- навчання та інструктаж персоналу з питань пожежної безпеки та дій у разі витокі.

#### **Класифікація приміщень холодильних установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою**

Згідно з нормами технологічного проектування (ОНТП), усі виробничі приміщення та будівлі класифікуються відповідно до ступеня вибухопожежної та пожежної небезпеки на категорії: А, Б, В, Г та Д.

Для холодильних установок, відповідно до чинних нормативів, встановлена така класифікація:

- холодильні камери — відносяться до категорії Д (приміщення з низьким ризиком займання),

- машинні відділення — також належать до категорії Д,

- апаратні відділення — класифікуються як Д.

Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), машинні та апаратні приміщення холодильних установок, які використовують фреонові холодоагенти, відносяться до категорії пожежонебезпечних приміщень класу П-

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		57

1 або П-2. У зв'язку з цим до електромонтажного обладнання в таких зонах висуваються підвищені вимоги:

- усе електрообладнання повинно мати закритий тип виконання;
- розподільчі щити та трансформаторні підстанції не допускається розміщувати безпосередньо у машинних та апаратних відділеннях;
- рекомендується використовувати брызкозахищене обладнання;
- допускається встановлення холодильного обладнання в одному приміщенні з іншим технологічним устаткуванням за умови відсутності джерел відкритого вогню або нагрітих поверхонь із температурою вище 350 °С.

Ці вимоги мають на меті забезпечити безпечну експлуатацію холодильного обладнання та мінімізувати ризики виникнення пожежі чи вибуху в умовах виробництва.

#### **Забезпечення вибухобезпечної та безпечної експлуатації обладнання**

Безпечна експлуатація холодильних установок, особливо тих, що працюють із тиском, передбачає виконання комплексу заходів, спрямованих на запобігання аваріям, вибухам та витокам небезпечних речовин. Одним із ключових аспектів цього процесу є випробування та технічний огляд судин і апаратів, які перебувають під тиском. Посудина, що працює під тиском - герметично закрита ємність, призначена для проведення хімічних і теплових процесів.

На всі посудини, і апарати холодильних установок незалежно від виду хладагента поширюються Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском, затверджені Держтехнаглядом.

Найчастішими причинами аварій і вибухів посудин, що працюють під тиском, є перевищення гранично допустимого тиску, порушення температурного режиму, втрата посудиною механічної міцності, порушення технологічного режиму роботи, недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу та відсутність необхідного технологічного нагляду.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		58

Будь-які посудини, що працюють під тиском, виготовляють на підприємствах, маючих в своєму розпорядженні відповідну технічну базу і мають дозвіл інспекції Держтехнагляду на їх виготовлення.

Всі посудини, що працюють під тиском, до їх пуску в роботу повинні бути зареєстровані в органах Держтехнагляду.

Посудини, що працюють під тиском, повинні піддаватися гідравлічним випробуванням.

На судинах холодильних установок гідравлічні випробування дозволяється замінювати пневматичними на пробний тиск. Внутрішній огляд посудин холодильних установок з-за їх конструкції замінюється пневматичними випробуваннями. Про проведені випробування проводять запис у паспорт посудини. Одним із способів захисту від високих тисків є запобіжні клапани.

Запобіжний клапан — гідроклапан, призначений для захисту від механічного руйнування обладнання і трубопроводів надлишковим тиском, шляхом автоматичного випуску надлишку рідкого, паро- чи газоподібного середовища з систем і посудин з тиском, що перевищив встановлене значення. Клапан також повинен забезпечувати припинення скидання середовища при відновленні робочого тиску. Запобіжний клапан є арматурою прямої дії, що працює безпосередньо від робочого середовища, поряд з більшістю конструкцій захисної арматури і регуляторами тиску прямої дії.

Небезпечний надлишковий тиск може виникнути в системі як в результаті сторонніх чинників (неправильна робота обладнання, передача тепла від сторонніх джерел, неправильно зібрана тепломеханічна схема і т.д.), так і в результаті внутрішніх фізичних процесів, зумовлених певною вихідною подією, не передбаченою при нормальній експлуатації. Запобіжні клапани встановлюються скрізь, де це може статися, але особливо вони важливі в сфері експлуатації промислових та побутових об'єктів, що працюють під тиском.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		59

Існують і інші види запобіжної арматури, але клапани є найпоширенішими через простоту своєї конструкції, легкості налаштування, розмаїття видів, розмірів і конструктивних виконань.

Головною і найбільш відповідальною вимогою, яка ставиться до запобіжних клапанів, є висока надійність, що включає в себе:

- безвідмовне і своєчасне відкриття клапана при заданому перевищенні робочого тиску в системі;
- забезпечення клапаном необхідної пропускної здатності у відкритому положенні;
- здійснення своєчасної зворотної посадки (закриття) з необхідним ступенем герметичності при заданій величині падіння тиску в системі після аварійного спрацьовування і збереження встановленого рівня герметичності при подальшому зростанні тиску до величини робочого;
- забезпечення стабільності роботи, тобто збереження протягом усього терміну експлуатації і заданого числа циклів спрацьовування параметрів налаштування, і необхідного рівня герметичності запірного органу при робочому тиску.

Запобіжні клапани підлягають періодичній перевірці в спеціалізованій організації або випробуванню в дії. Всі клапани повинні бути випробувані на міцність, щільність, а також герметичність сальникових з'єднань і ущільнювальних поверхонь.

На заводі-виробнику судини, призначені для роботи під тиском, підлягають обов'язковим випробуванням на міцність і герметичність, що засвідчує їх придатність до експлуатації. Однак, впродовж експлуатаційного строку обладнання, необхідне регулярне технічне обслуговування та діагностика, які здійснюються у формі технічного огляду.

Технічний огляд включає:

- внутрішній огляд апарату (візуальна інспекція внутрішніх поверхонь);
- пневматичні випробування (перевірка міцності та герметичності під тиском).

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		60

Періодичність технічного огляду визначається характером обладнання та умовами експлуатації:

- внутрішній огляд проводиться 1 раз на 2 роки;
- якщо внутрішній огляд з об'єктивних причин неможливий (наприклад, конструктивно немає доступу до внутрішніх порожнин), його замінюють на пневматичні випробування, які виконуються у ті ж терміни;
- апарати, доступні для внутрішнього огляду, додатково підлягають пневматичному випробуванню не рідше ніж 1 раз на 8 років.

У холодильних установках більшість апаратів проходять випробування лише на щільність (герметичність), оскільки їхні конструкції зазвичай не мають зварних швів великого об'єму, які потребують перевірки на міцність під гідравлічним тиском.

Значення тиску для перевірки герметичності:

- сторона нагнітання — 2,0 МПа;
- сторона всмоктування — 1,6 МПа.

Ці значення визначаються відповідно до робочих параметрів системи та мають забезпечити надійну діагностику можливих витоків холодоагенту або зниження тиску внаслідок нещільностей з'єднань.

Загалом, дотримання регламентів технічного огляду, своєчасне виявлення дефектів та відповідність обладнання вибухопожежним нормам — критично важливі умови забезпечення безаварійної та тривалої експлуатації холодильного обладнання, особливо у випадках використання високозаймистих природних холодоагентів, таких як пропан (R-290).

### **Розрахунок запобіжного клапана**

В системі з підвищеним тиском для безпеки встановлюються запобіжні клапани.

Кількість запобіжних клапанів, їх розміри і пропускну здатність розраховують з умови, щоб у посудині тиск не міг перевищити робочий більш ніж на 0,05 МПа для судин з робочим тиском до 0,3 МПа включно, на 15% для судин з робочим тиском від 0,3 до 0,6 МПа і на 10% для судин з робочим

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		61

тиском понад 6,0 МПа. Не рідше одного разу на 12 місяців запобіжні клапани перевіряють на стенді на спрацьовування з наступним пломбуванням.

Робоче середовище, що виходить з запобіжного клапана, відводиться в безпечне місце.

Проведемо розрахунок запобіжного клапана нашої установки.

Тиск спрацьовування запобіжного клапана:

Сторона нагнітання 2,1 МПа

Сторона всмоктування 1,6 МПа

Розрахуємо запобіжний клапан для посудини з R290.

Вихідні дані:

Витрата пропану  $M_a = 0,127$  кг/с;

$p_1 = 2,1 \cdot 10^6$  МПа;

$p_2 = 0,1 \cdot 10^6$  МПа;

Щільність пропану при тиску  $p_1 = 2,1 \cdot 10^6$  МПа і  $t = 75$  °C  $\rho = 42,8$  кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт витрати  $\mu = 0,75$

Коефіцієнт відношення  $p_2/p_1$   $V = 0,45$  - залежить від показника адіабати R290 ( $k = 1,13$ ) та відношення тисків  $p_2/p_1 = 0,0476$  [11].

Площа перерізу клапана визначаємо за формулою:

$$S_{\text{кл}} = \frac{M}{\mu * V * \sqrt{2 * \rho * (P_1 - P_2)}} = \frac{0,127}{0,75 * 0,45 * \sqrt{2 * 42,8 * (2,1 - 0,1) * 10^6}} = 2,276 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Діаметр прохідного перерізу клапана:

$$d = \sqrt{\frac{S_{\text{кл}}}{0,785}} = \sqrt{\frac{2,276 \cdot 10^{-5}}{0,785}} = 0,0060 \text{ м}$$

Вибираємо запобіжний клапан з  $d_y = 6$  мм

### **Методи визначення місць витoku холодильних агентів.**

Нещільності в холодильних установках хладону виявляють за допомогою розчину мильної емульсії, галоїдних ламп і течешукачів. Перспективним способом є додавання до хладонів індикаторів, що фарбують, утворюють в місцях нещільностей стійкі колірні плями.

					Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	62

При контролі за допомогою розчинів мильної емульсії Нещільності виявляють по бульбашках, що виникають у місцях витоку. Чутливість розчину мильної емульсії невисока, контроль герметичності систем холодоагенту трудомісткий, з розчином складно працювати при негативному середовищі t.

Принцип дії галоїдної лампи ґрунтується на властивостях сполук, що містять галоїди (фтор та хлор) змінювати колір полум'я пальника у присутності нагрітої до 600-700 градусів Цельсія міді. Галоїдні течешукачі (типу ВАГТІ-3, ГТІ-6, БГТІ-5) мають більш високу чутливість, ніж галоїдні лампи. Принцип дії течешукачів заснований на властивості розпеченої платини збільшувати іонну емісію за своєю поверхнею в присутності газів, що містять галоїди.

При визначенні місць витоку хладону галоїдними лампами та течешукачами приміщення машинного відділення попередньо вентилують, під час перевірки у приміщенні не повинно бути сильних потоків повітря.

### **Електробезпека**

Електробезпека - система організаційних і технічних заходів, що забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму. Небезпека електричного струму на відміну від інших небезпек посилюється тим, що людина не в змозі без спеціальних приладів виявити напругу дистанційно, а також швидкоплинністю ураження - небезпека виявляється, коли людина вже вражена. Аналіз смертельних нещасних випадків показує, що на частку поразок електричним током припадає на виробництві до 40%, в енергетиці - до 60%; більша частина поразок (до 80%) відбувається в електроустановках напругою до 1000 В (110 - 380 В).

Проходячи через живі тканини людини, електричний струм чинить термічний (опіки), електролітичний (електроліз) і біологічний вплив. Розрізняють також механічні пошкодження від впливу електричного струму. Це приводить до різних порушень в організмі, викликаючи як місцеве ураження тканин і органів, так і загальну поразку організму. Розрізняють два види уражень електричним струмом: місцеві електричні травми (електротравма) і електричний удар.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		63

Однофазні замикання струму, які можуть виникнути в електричних машинах, апаратах, приладах, на ЛЕП, небезпечні тим, що на корпусах і опорах з'являються напруги, достатні для ураження людини і виникнення пожежі. Струм замикання створює небезпечні напруги не тільки на самому обладнанні, а й біля нього, розтікаючись з основ і фундаментів.

Захист від ураження електричним струмом та возгоряння можна здійснювати захисним відключенням (відключають пошкоджену ділянку мережі швидкодіючим захистом), або захисним заземленням (знижують напруги дотику і кроку) або зануленням (відключають обладнання і знижують напруги дотику і кроку на період, поки не спрацює відключаючий апарат).

Розглянемо захисне заземлення і проведемо розрахунок системи штучного заземлення.

Головне призначення захисного заземлення - понизити потенціал на корпусі електрообладнання до безпечної величини.

Захисним заземленням називається навмисне електричне з'єднання з землею металевих нетокопроводячих частин, які можуть опинитися під напругою. Корпуси електричних машин, трансформаторів, світильників, апаратів і інші металеві нетоковедучі частини можуть опинитися під напругою при замиканні їх струмоведучих частин на корпус. Якщо корпус при цьому не має контакту із землею, дотик до нього так само небезпечний, як і дотик до фази. Таким чином, безпека забезпечується шляхом заземлення корпусу заземлювачем, маючим малий опір заземлення та малий коефіцієнт напруги дотику.

### **Розрахунок системи штучного заземлення**

В установках напругою до 1000 В опір системи заземлення повинен бути менше або рівним 4 Ом.

Визначимо розрахункове значення опору ґрунту:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{гр}} \cdot \psi = 45 \cdot 1,5 = 67,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де  $\rho_{\text{гр}}$  - це наближене значення питомого опору ґрунту (чорнозем);

						Лист
						64
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$\psi$  - Кліматичний коефіцієнт, що залежить від сезонних коливань опору ґрунту (чорнозем).

Визначаємо опір одного заземлювача вертикального:

$$R_b = \frac{\rho_{расч}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right), \text{ Ом}$$
$$R_b = \frac{67.5}{2 \cdot 3.14 \cdot 2} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 2}{0.076} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1.1 + 2}{4 \cdot 1.1 - 2} \right) = 23.933 \text{ Ом}$$

Визначаємо число вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_b}{R_m} = \frac{23.933}{4} = 5.98 \text{ шт.}$$

Отримане число вертикальних заземлювачів округляємо до найближчого більшого стандартного значення: 2; 4; 6; 10; 20; 40; 60; 100.

Приймаємо  $n = 6$  шт.

Визначаємо опір системи вертикальних заземлювачів:

$$R_{CB} = \frac{R_b}{n \cdot \eta_b} = \frac{23.933}{6 \cdot 0.74} = 5.39 \text{ Ом,}$$

де  $\eta_b = 0,74$  - коефіцієнт використання вертикального заземлювача.

Визначаємо довжину горизонтальної заземлювача:

$$L = (n - 1) \cdot l' = (6 - 1) \cdot 4 = 20 \text{ м.}$$

Визначаємо опір горизонтального заземлювача:

$$R_r = \frac{\rho_{расч}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \eta_r} \cdot \ln \frac{L^2}{t_o \cdot d} \text{ Ом,}$$
$$R_r = \frac{67.5}{2 \cdot 3.14 \cdot 20 \cdot 0.75} \cdot \ln \frac{20^2}{0.6 \cdot 0.076} = 6.506 \text{ Ом,}$$

де  $\eta_r = 0,75$  - коефіцієнт використання горизонтального заземлювача.

Визначаємо опір системи заземлення:

$$R_{сист} = \frac{R_{CB} \cdot R_r}{R_{CB} + R_r} = \frac{5.39 \cdot 6.506}{5.39 + 6.506} = 2.95 \text{ Ом.}$$

### Розрахунок системи штучного освітлення

Необхідно визначити яка повинна бути потужність електричної освітлювальної установки для створення у виробничому приміщенні заданої освітленості.

					Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	65

Для розрахунку використовується метод світлового потоку, що враховує світловий потік, відбитий від стелі та стін.

Вихідні дані:

- Тип джерела світла - люмінесцентні лампи;
- Визначаємо систему освітлення - загальна;
- Підбираємо світильники ЛСП по дві лампи в кожному;
- Розміри приміщення -  $A = 8$  м,  $B = 5$  м,
- Висота робочої поверхні  $H = 4$  м.
- Висота підвісу світильника над робочою поверхнею.

Приймаються до установки загальну рівномірну систему з світильником типу ЛСП з двома лампами типу ЛБ.

Для визначення коефіцієнта використання світлового потоку визначаємо індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{H \cdot p \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 5}{4 \cdot (8 + 5)} = 0,77,$$

Приймаються коефіцієнт відбиття стелі  $\rho_n = 50\%$ ,

а коефіцієнт відбиття стіни  $\rho_c = 30\%$ .

Світловий потік групи світильників при лампах розжарювання і при люмінесцентних лампах (ЛМ) дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E_n * S * z * k}{N * \eta}$$

де  $E_n$  - нормована мінімальна освітленість, Лк;

$S$  - площа освітлюється приміщення, м;

$z$  - коефіцієнт мінімального освітлення, рівний для люмінесцентних ламп 1,1;

$k$  - коефіцієнт запасу 1,4;

$N$  - кількість світильників у приміщенні 6;

$\eta$  - Коефіцієнт використання світлового потоку ламп, що залежить від ККД і кривий розподілу сили світла світильника, коефіцієнта відбиття стелі  $\rho_n$  і стін  $\rho_c$ , висоти підвісу світильників та показника приміщення  $i$ .

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		66

$$\eta = 35$$

Рекомендована освітленість для приміщення не менш  $E_n = 250$  лк,  
коефіцієнт запасу  $k = 1.4$ .

Площа освітлюючого приміщення:  $S = A \cdot B$

$$S = 8 \cdot 5 = 40 \text{ (м}^2\text{)}$$

Світловий потік дорівнює:

$$\Phi = \frac{250 \cdot 40 \cdot 1,1 \cdot 1,4}{6 \cdot 35} = 117,3 \text{ (лм)}$$

Вибирається тип ламп - ЛБ80 - люмінесцентні лампи.

Приймаються до установки 6 ламп типу ЛБ80 зі світловим потоком 5220лм.

Визначимо потужність освітлювальної установки:

$$P = n \cdot N \cdot P_1,$$

де

$n$  - кількість ламп;

$N$  - кількість світильників;

$P_1$  - потужність лампи, Вт.

$$P = 4 \cdot 6 \cdot 80 = 1920 \text{ (Вт)}.$$

**Перша допомога при ураженні електричним струмом** Рятування ураженого залежить від дії електричного струму, а також від швидкості відділення його від струму, а також від швидкості і правильності надання йому допомоги. Зволікати в її наданні може викликати загибель ураженого. При ураженні електричним струмом смерть часто буває клінічною, тому ніколи не треба відмовлятися від надання допомоги ураженому і вважати його мертвим, якщо не має дихання, серцебиття, пульсу.

При визволенні ураженого від дії струму необхідно негайно надати йому лікарську допомогу у відповідності з його станом.

Якщо уражений не втратив свідомості, його треба відвести або віднести в зручне для відпочинку місце, створити повний спокій, запропонувати полежати, створити приплив свіжого повітря.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		67

Якщо уражений знаходиться у безсвідомості, але дихає нормально і у нього прослуховується пульс, потрібно негайно визвати лікаря, а до його приходу надати допомогу – привести ураженого у свідомість, давати нюхати нашатирний спирт, злегка змочити лице водою, забезпечити приплив свіжого повітря.

Якщо уражений знаходиться в тяжкому стані, тобто не дихає, або переривчасто, необхідно, не втрачаючи часу, приступити до штучного дихання.

Якщо в ураженого відсутня свідомість, дихання, пульс, шкіра синюча, і зіниці широкі, можна припустити, що він знаходиться в стані клінічної смерті, і негайно приступити до штучного дихання по способу “із рота в рот”, або “із рота в ніс” та зовнішнього масажу серця. Ні в якому разі не можна заривати ураженого в землю, тому це принесе тільки шкоду і приведе до втрати дорогих для його спасіння хвилин.

При ураженні блискавкою надається така сама допомога. Для виконання штучного дихання ураженого необхідно покласти на спину, розстібнути одяг. Перед тим, як розпочати штучне дихання, необхідно в першу чергу забезпечити прохідність верхніх дихальних шляхів, які в положенні на спині в без відомості завжди закриті запалим язиком. Крім того, в порожнині рота може знаходитися чужорідний вміст, який необхідно видалити пальцем, який можна обгорнути тканиною чи бинтом. Після цього, той, хто надає допомогу розміщується збоку від голови ураженого, під лопатки кладе валик із згорнутим одягом, одну руку підсовує під шию ураженого, а долонь іншої руки – на його лоб, максимально запрокинути голову. При цьому корінь язика піднімається і визволяє гортань, а рот відчиняється. Той, хто надає допомогу нахиляється до обличчя, робить глибокий вдих відкритим ротом, щільно охоплює губами відкритий рот і робить енергійний видих, з деяким зусиллям вдуваючи повітря в його рот; одночасно він закриває ніс ураженого щогою чи пальцями руки, яка знаходиться на лобі. При цьому обов’язково треба наглядати за грудною клітиною ураженого, яка піднімається. Як тільки грудна клітина піднімається, нагнітання повітря припиняється, той, хто надає допомогу перевертає обличчя в

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		68

сторону, відбувається видих ураженого. Таким чином треба робить 10-12 вдувань за хвилину, через кожні 5-6 секунд.

Якщо після вдувань повітря, грудна клітина не розправляється, необхідно висунути нижню щелепу ураженого вперед. Для цього чотирма пальцями обох рук беруть щелепу ззаду за кутки і, упираючись великими пальцями в її край нижче куточків рота, відтягують і висовують щелепу вперед так, щоб нижні зуби стояли попереду верхніх.

Якщо щелепа ураженого сильно стиснута і відкрити рота не вдається, слід проводити штучне дихання “із рота в ніс”. Штучне дихання проводяться до повного глибокого і ритмічного самостійного дихання.

При ураженні електричним струмом може наступити не тільки зупинка дихання, але і зупинка кровообігу, тоді коли серце не забезпечує циркуляції крові по судинам; якщо натискати на грудину штовховими рухами, то кров буде надходити з серця, майже так, як це відбувається при його природному скороченні. Якщо допомогу надає одна людина, вона розташовується збоку від ураженого і, нахилившись, робить два швидких енергійних вдування (по способу “із рота в рот”, або “із рота в ніс”), потім піднімається, залишається на цій же стороні від ураженого, долоню однієї руки він кладе на нижню половину грудини, а пальці піднімає. Долонь другої руки він кладе поверх першої руки поперек або уздовж та натискає, допомагаючи нахилом свого корпусу. Руки при натискуванні повинні бути направлені у ліктях. Натискати слід швидкими поштовхами так, щоб змістити грудину на 4-5 см. тривалість натискання не більше 0,5 с. Інтервал між окремими натисканнями - 0,5 с. в паузах рук з грудини не знімати, пальці залишаються прямі, руки повністю випрямлені в ліктях. Якщо поштовхування проводить одна людина, співвідношення “дихання-масаж” 2:15, якщо проводять дві особи – 1:5.

Після того, як поновиться серцева діяльність, буде пульс, масаж серця негайно припиняють, проводжаючи штучне дихання при слабкому диханні ураженого і стараючись, щоб природний та штучний вдих збігалися. При накопленні самостійного дихання штучне дихання також припиняють. Якщо

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		69

серцева діяльність, або самостійне дихання не поновлюється, але реанімаційні заходи ефективні, то їх можна припинити тільки при передачі потерпілого у руки медичного персоналу.

### **Пожежна профілактика**

Задачі і загальні міри пожежної профілактики

Пожежна профілактика являє собою єдиний комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на попередження і локалізацію пожеж і вибухів. До цих заходів відносяться:

- Міри пожежної безпеки, що передбачаються при проектуванні і будівництві підприємств.
- Міри пожежної безпеки, прийняті при проведенні технологічного процесу, тобто в період експлуатації підприємства.

При розробці діючих методів попередження і ліквідації пожеж і вибухів використовують загальні теоретичні положення про горіння і вибухи, а також дані, отримані при вивченні причин пожеж і вибухів на виробництві. Дослідженнями встановлено, що основними і найбільш частими причинами загорянь, пожеж і вибухів на підприємствах хімічної промисловості є:

- порушення елементарних правил пожежної безпеки;
- порушення режиму технологічних процесів;
- несправність електроустаткування, електромереж і порушення електротехнічних правил;
- самозаймання, статична електрика, грозові розряди й інші причини.

Класифікація виробництв по їх пожежо- і вибухонебезпечності.

Будівельними нормами і правилами усі виробництва і склади по вибухо- і пожежонебезпеці поділяються на шість категорій, що позначають у такий спосіб: А и Б - вибухопожежонебезпечні; У, Г и Д - пожежонебезпечні; Е - вибухонебезпечні.

						Лист
						70
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Будівельними нормами і правилами будівельні матеріали і конструкції по займистості розділяються на три групи:

- незаймисті;
- важко займисті;
- займисті.

Виробнича санітарія

Вентиляція як засіб створення оптимального мікроклімату.

За способом переміщення повітря розрізняють системи природної та механічної вентиляції. Природна вентиляція забезпечує повітрообмін в приміщеннях, обумовлений різницею густин зовнішнього і внутрішнього повітря та вітрових тиском. При природній організованю вентиляції (аерації) повітрообмін відбувається через отвори огорожувальних конструкцій будівель. Для видалення повітря використовують також дефлектори, по периметру яких в результаті дії вітру створюється розрідження. Аерацію застосовують для боротьби зі значними тепловиділеннями.

Механічну вентиляцію застосовують, коли необхідні параметри мікроклімату і чистота повітря в приміщеннях не можуть бути забезпечені природною вентиляцією. При механічній вентиляції повітря переміщається за допомогою вентиляторів.

За характером дії механічну вентиляцію підрозділяють на припливну, витяжну і припливно-витяжну, за місцем дії - на загально-обмінну та місцеву.

Припливну вентиляцію передбачають при необхідності повної заміни повітря в приміщенні чистим зовнішнім повітрям, а також при необхідності виключити потрапляння забрудненого повітря з інших приміщень. Витяжна вентиляція призначена для видалення з приміщень забрудненого повітря, надлишкових тепло-і вологовиділення, при цьому у приміщенні створюється знижений тиск. Приміщення, у яких можливе раптове виділення великих кількостей шкідливих або вибухонебезпечних газів або парів, обладнають аварійної витяжною вентиляцією.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		71

Припливно-витяжна (механічна) вентиляція одночасно здійснити і подачу свіжого, і видалення забрудненого повітря.

Загальнообмінну вентиляцію застосовують при рівномірному розподіленню шкідливих речовин і розміщення робочих місць по всьому приміщенню.

Місцева припливна вентиляція подає повітря на строго певні місця робочої зони. До систем такої вентиляції належать повітряні душі й завіси. Місцева витяжна вентиляція видаляє шкідливі речовини, надмірну теплоту (і вологу) безпосередньо з місця їх виділення. Вентиляцію здійснюють за допомогою спеціальних пристроїв: кожухів і камер, герметично приховують обладнання витяжних шаф і парасольок, відсмоктуючих панелей, бортових відсмоктувачів. Система вентиляції не повинна створювати шуму і вібрації, перевищувати їх допустимий рівень.

Типи вентиляційних систем

Місцева та загальнообмінна вентиляція

Системи вентиляції класифікуються по наступних ознаках:

- За здатністю створення тиску і переміщення повітря: з природною і штучною (механічним) спонукою
- За призначенням: припливні і витяжні
- За зоною обслуговування: місцеві і загально обмінні
- За конструктивним виконанням: каналні та безканалні

По кількості повітря на людину в годину. Наприклад, в бомбосховищі - не менше 2,5 м<sup>3</sup>/годину;, у офісному приміщенні - 30 м<sup>3</sup>/годину для відвідувачів, що знаходяться в приміщенні не більше 3-х годин, для людей, що постійно знаходяться, - не менше 60 м<sup>3</sup>/годину. Розрахунок вентиляції проводиться за допомогою наступних параметрів: продуктивність по повітрю (м<sup>3</sup>/годину), робочий тиск (Па) і швидкість потоку повітря у повітропроводах (м/с), допустимий рівень шуму (дБ), потужність калорифера (кВт).

Місцева вентиляція

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

Місцевою вентиляцією називається така вентиляція, при якій повітря подається до певних місць (припливна місцева вентиляція), або коли забруднене повітря видаляється тільки від місць утворення шкідливих виділень (місцева витяжна вентиляція). Місцева припливна вентиляція може забезпечувати приплив чистого повітря (заздалегідь очищеного і підігрітого) до певних місць. І навпаки, місцева витяжна вентиляція видаляє повітря від певних місць з найбільшою концентрацією шкідливих домішок в повітрі. Прикладом такої місцевої витяжної вентиляції може бути витяжка на кухні, яка встановлюється над газовою або електричною плитою. Найчастіше використовуються такі системи в промисловості

Розрахунок припливно-витяжної вентиляції для приміщення

Вихідні дані:

Розміри приміщення  $A = 8$  м,  $B = 5$  м,  $H = 4$  м

Об'єм приміщення  $V_{\text{п}} = A \cdot B \cdot H = 8 \cdot 5 \cdot 4 = 160$  м<sup>3</sup>

Необхідна кількість повітря:

$$L = V_{\text{п}} \cdot k \text{ м}^3/\text{час}$$

де  $V_{\text{пом}}$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$k$  – кратність повітрообміну, 1/час.

Припливно-витяжна вентиляція  $k = 3$ :

$$L_{\text{пв}} = 160 \cdot 3 = 480 \text{ м}^3/\text{час}$$

Аварійна вентиляція  $k = 4$ :

$$L_{\text{пв}} = 160 \cdot 4 = 640 \text{ м}^3/\text{час}$$

Розраховуємо потужність електродвигуна вентилятора:

$$N = \frac{k_{\text{з}} * L * \Delta P * 10^{-6}}{3,6 * \eta_{\text{а}} * \eta_{\text{вд}}} \text{ кВт}$$

де  $k_{\text{з}} = 1,5$  – коефіцієнт запасу

$\Delta P$  - опір руху повітря в мережі (200 - 400 Па),

$\eta_{\text{вент}}$  - ККД вентилятора (0.6 - 0.8),

						Лист
						73
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$\eta_n$  - ККД приводу (0.9 - 1),

Припливно-витяжна вентиляція

$$N = \frac{1,5 \cdot 480 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 0,65 \cdot 0,9} = 0,137 \text{ кВт}$$

Аварійна вентиляція:

$$N = \frac{1,5 \cdot 640 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 0,65 \cdot 0,9} = 0,183 \text{ кВт}$$

### Долікарська допомога при отруєнні пропаном:

Ознаки отруєння пропаном:

- слабкість, запаморочення;
- головний біль;
- нудота, блювання;
- порушення координації, сплутаність свідомості;
- прискорене дихання або, навпаки, уповільнення (у тяжких випадках);
- втрата свідомості;
- задуха при тривалому перебуванні в атмосфері з низьким вмістом кисню.

Невідкладні заходи долікарської допомоги:

1. Негайно вивести постраждалого на свіже повітря або до добре провітрюваного приміщення.

2. Забезпечити доступ кисню: розстібнути одяг, що стискає груди й шию; при можливості — забезпечити інгаляцію киснем (лише медпрацівниками).

3. Укласти постраждалого в зручне горизонтальне положення, зігріти.

4. Контролювати дихання та пульс. Якщо дихання відсутнє — почати штучну вентиляцію легень (рот у рот або рот у ніс). Якщо серцева діяльність зупинилася — провести серцево-легеневу реанімацію (СЛР).

5. Не давати пити чи їсти, якщо свідомість порушена.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		74

6. Забезпечити повний спокій до прибуття медичної допомоги.

Що робити не можна:

- не залишати постраждалого одного;
- не використовувати відкритий вогонь поблизу (пропан вибухонебезпечний!);
- не намагатися вводити лікарські засоби самостійно без медичних показань.

Викликати швидку допомогу коли:

- втрата свідомості;
- ускладнене або відсутнє дихання;
- сильна дезорієнтація, судоми;
- підозра на тривале перебування в атмосфері без кисню.

						Лист
						75
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

1. Попереднє охолодження є критичним етапом післязбиральної обробки плодів, який дозволяє суттєво знизити втрати врожаю, зберегти його якість, споживчі властивості та продовжити термін зберігання, особливо в умовах високих температур південного регіону України.

2. Запропонована конструкція тимчасового холодильника є оптимальним рішенням для малих і середніх фермерських господарств, оскільки забезпечує мобільність, енергоефективність, можливість роботи від альтернативних джерел енергії та адаптивність до обсягів врожаю.

3. Проект сприятиме формуванню безперервного холодильного ланцюга від поля до споживача, що відповідає сучасним вимогам аграрної логістики та підвищить експортний потенціал продукції.

4. Використання природного холодоагенту пропану (R-290) у холодильній установці забезпечує високу енергоефективність і мінімальний вплив на довкілля, що відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки та сталого розвитку агропромислового сектор.

						Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		76

## ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ ISO 2169:2003 — Фрукти й овочі. Фізичні умови зберігання на холоді. Визначання та вимірювання
2. ДСТУ ISO 6949:2005 — Фрукти та овочі. Зберігання в умовах регульованої атмосфери
3. Плодоовочесховища: проектування, оптимізація, розрахунки [Текст]: підручник / М. Г. Хмельнюк, В. П. Кочетов, А. В. Форсюк, Н. В. Жихарева; під заг. ред. М. Г. Хмельнюка ; ОНАХТ, НУХТ. — Одеса, 2018. — 228 с.
4. Холодильные установки. Проектирование: Уч. Пособие/ И.Г. Чумак, А.Ю. Лагутин, В.П. Чепурненко и др. Под ред. И.Г. Чумака. 3-е изд. – Одесса: Друк, 2007. – 480 с.
5. Холодильні установки спеціального призначення [Текст]: підручник / М. Г. Хмельнюк, О. С. Подмазко,; ОНАХТ. - Херсон : Грінь Д.С., 2011. - 420 с.
6. Явнель Б.К. Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. – 3-е изд. – М.: Агропромиздат, 1989. – 223с.
7. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин. Под общ. ред. И.А. Сакуна. – Л.: Машиностроение. Л.о. 1987. – 423 с.
8. Мелейчук С.С., Арсеньев В.М. Монтаж, експлуатація, обслуговування холодильних і теплонасосних установок. Суми: СДУ, 2011. – 183 с.
9. Самойлов И.А., Игнатьев В.Г. «Охрана труда при обслуживании холодильных установок». - М.: Агропромиздат, 1989. - 224 с.
10. Основи охорони праці [Текст] : навч. посіб. / В. В. Березуцький, Т. С. Бондаренко, Г. Г. Валенко, Л. А. Васьковець ; за заг. ред. В. В. Березуцького; Нац. техн. ун-т "ХПІ". — 2-ге вид., пер.. і доп. - Харків : Факт, 2008. — 480 с.
11. Охрана труда в машиностроении: Учебник для машиностр. вузов / Е.Я. Юдин, С.В. Белов, С.К. Баланцев и др.; Под ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. - 432 с.

						Аркуш
ЗМ.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		77

ДОДАТКИ

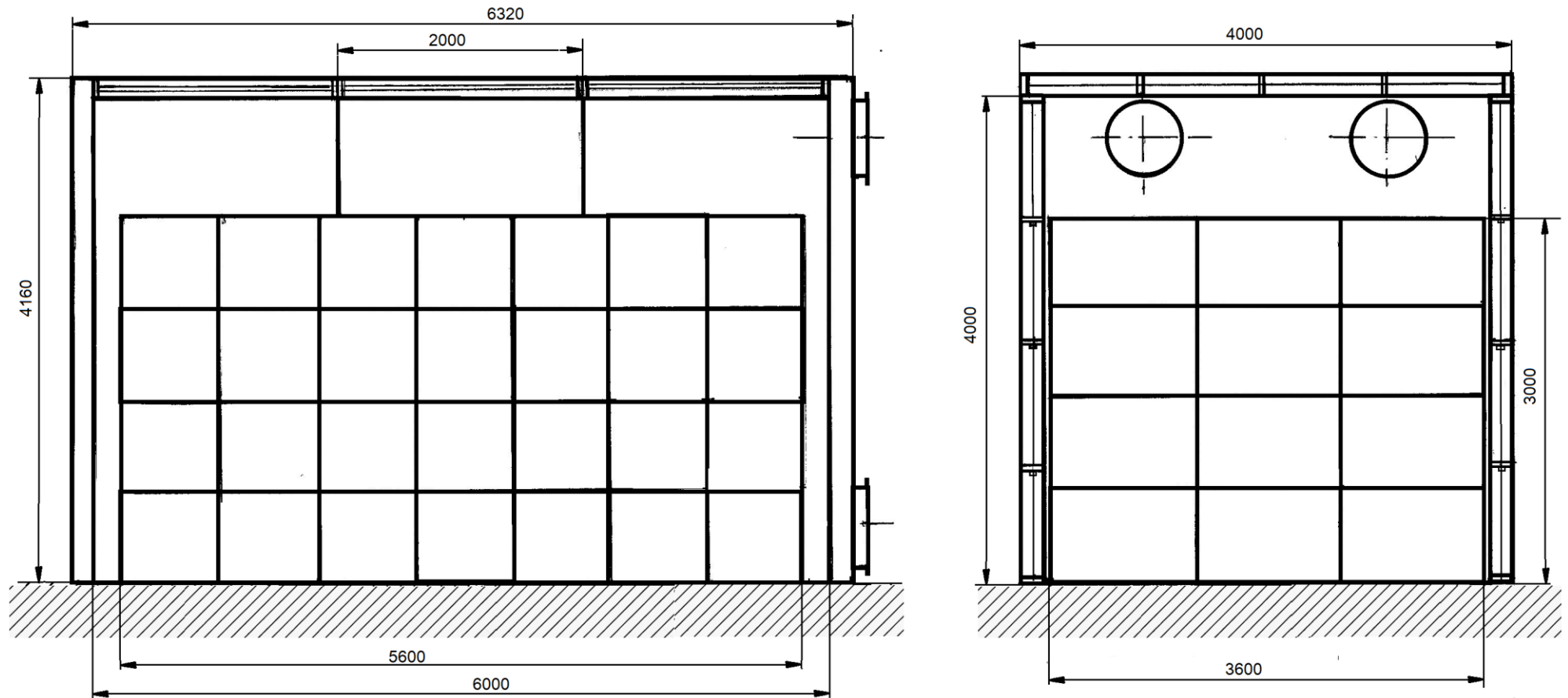


Рисунок Дод. 1 - Поздовжній та поперечний розрізи холодильника

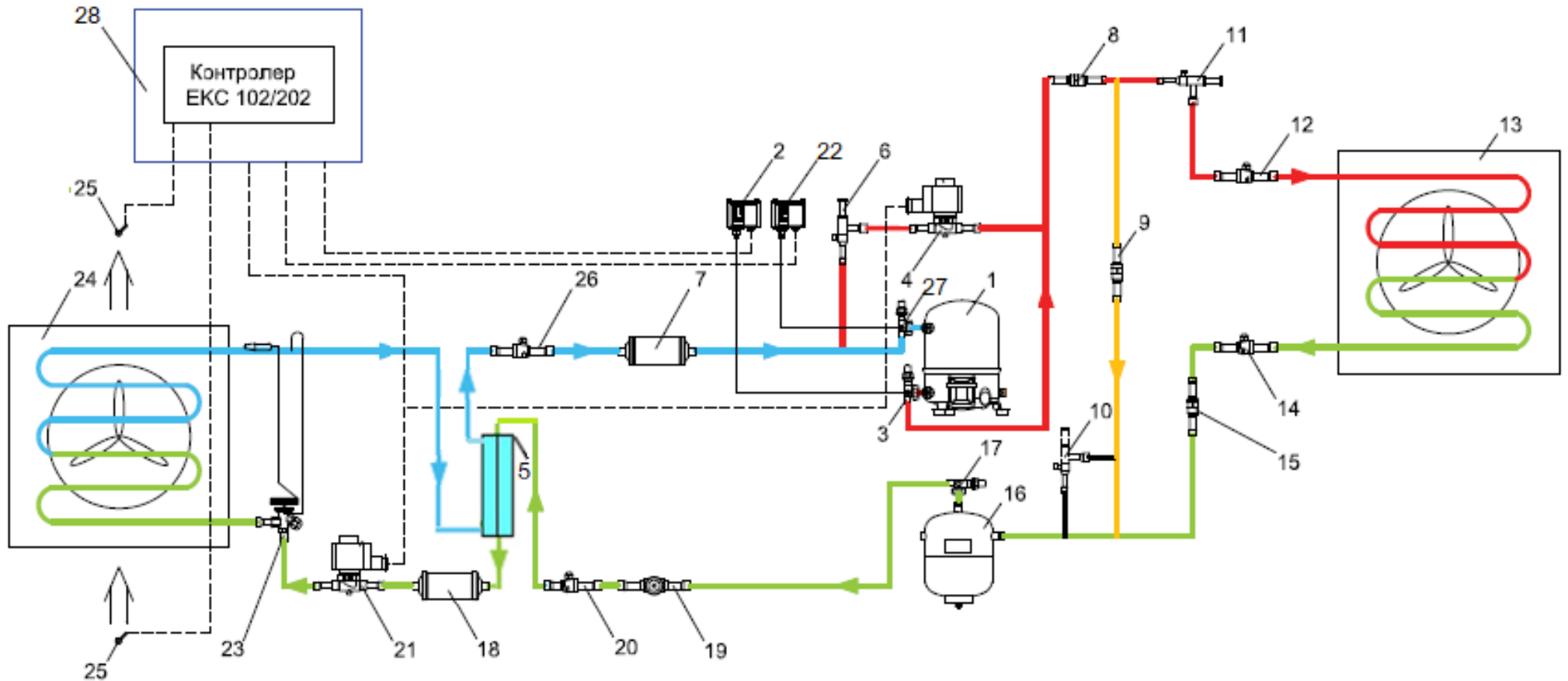


Рисунок Дод. 2 - Принципова схема холодильної машини: 1 –компресор; 2,22 -реле тиску; 3,17,27 -клапан запірний; 4, 21 -клапан соленоїдний; 5 регенеративний тепло-обмінник; 6 -регулятор продуктивності;7 –фільтр; 8,15 -клапан зворотний; 9 -клапан диферен-ціальний; 10, 11 -регулятор тиску; 2, 14, 20,26 -кран кульовий; 13 -конденсатор повітряний;16 -ресівер; 18 -фільтр-осушувач; 19 -скло оглядове; 23-терморегулюючий вентиль; 24 -повітроохолоджувач; 25 -датчик температури; 28 -щит електричний.

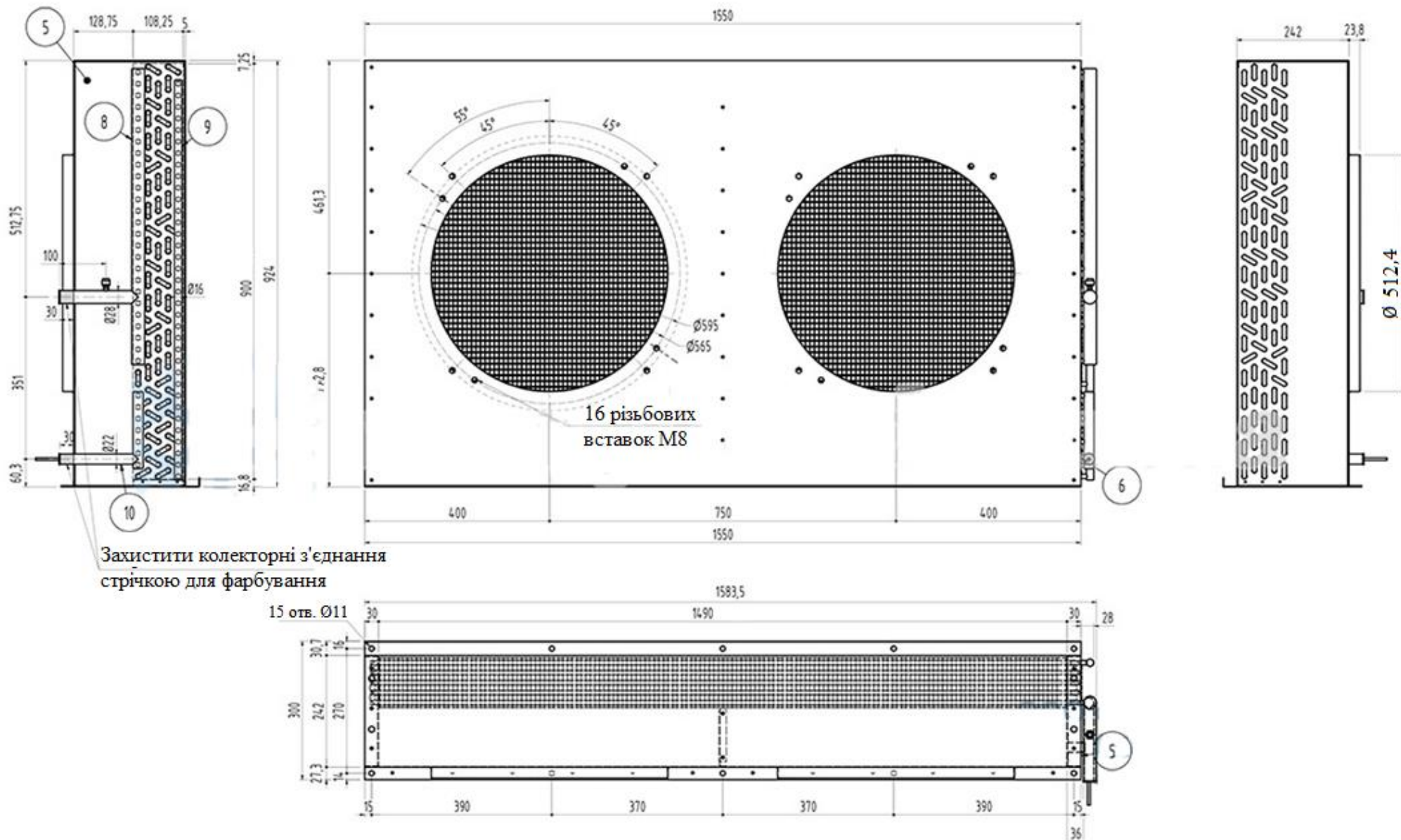


Рисунок Дод. 3 – Повітряний конденсатор

