

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний технологічний університет  
Кафедра кріогенної техніки



## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

На тему: «Енергетичний аналіз схем і циклів низькотемпературних машин з отриманням зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску»

Здобувача **Петюх Іван Васильович**  
(прізвище, ініціали)  
**КТ-262м2 групи**

Керівники: **д.т.н., професор**  
**Морозюк Лариса Іванівна**  
(посада, прізвище та ініціали)

Консультант **доц.Соколовська-Єфименко В.В.**  
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р., протокол № \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри КТ \_\_\_\_\_ **Юрій Симоненко**

Одеса - 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ІНЖЕНЕРНОЇ МЕХАНІКИ

Кафедра	Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти	магістр
Спеціальність	142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма	«Кріогенні технології виробництва, зрідження і транспортування природних газів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ  
д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«\_\_» \_\_\_\_ 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Петюх Іван Васильович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Енергетичний аналіз схем і циклів низькотемпературних машин з отриманням зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску»

»

керівники роботи д.т.н., професор Морозюк Лариса Іванівна  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом вищого навчального закладу від 30 10 2023 року № 631-03

2. Термін задачі здобувачем закінченої роботи 5 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Спроекувати каскадну машину з CO<sub>2</sub> в обох каскадах, конденсатор-випарник виконати з кожухопластинчастого моделі теплообмінника

4. Перелік питань, які потрібно розробити:  
Вступ; Аналітична частина; Аналіз літературних даних з діоксиду вуглецю; Аналіз літературних даних з кожухопластинчастих апаратів; Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженого CO<sub>2</sub> та сухого льоду; Теоретична частина; Визначення об'ємних та енергетичних характеристик каскадних машин; Розрахунки верхніх каскадів; Порівняльний аналіз характеристик циклів верхніх каскадів; Розрахунок кожухопластинчастого конденсатора-випарника з конденсацією R744 у пакеті пластин та кипінням R744 у просторі під кожухом; Техніка безпеки та особливості в обслуговуванні системи та обладнання для CO<sub>2</sub>; Економічні показники роботи; Розрахунок вартості науково-дослідницької кваліфікаційної роботи магістра; Розрахунок вартості досліджень і розробок; Висновки; Література.

5. Перелік графічного матеріалу  
Презентація Power Point (9 слайдів)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	доц. Соколовська-Ефименко В.В.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 02.02.2022 \_\_\_\_\_

Керівник \_\_\_\_\_ проф. Морозюк Л.І.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Петюх І.В

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і вивчення літератури	14 днів	
3	Розробка математичної моделі об'єкта	2 дні	
4	Вибір методу дослідження	20 днів	
5	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	15 днів	
6	Розробка графічних моделей	2 дні	
7	Аналіз результатів досліджень	2 дні	
8	Оформлення пояснювальної записки	2 дні	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	2 дні	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	2 дні	

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_  
( підпис )

Іван ПЕТЮХ  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Лариса МОРОЗІЮК-  
(прізвище та ініціали)

*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 кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчинності*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Петюх І.В.  
(ПІБ)

\_\_\_\_\_  
( підпис )

## АНОТАЦІЯ

*Діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>) сучасний матеріал, що застосовується в різних сферах діяльності людини в усіх станах: газу, рідини, сухого льоду., і в останні роки його популярність тільки зростає. В роботі представлено установку отримання зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску. Обґрунтовано вибір температурного режиму, технологічної схеми каскадної машини з одноступеневим циклом нижнього та двоступеневим у верхньому каскаді. Робочими речовинами верхнього каскаду є аміак, пропан та діоксид вуглецю. Виконано співставлення характеристик каскадів, оцінено експлуатаційні можливості робочих речовин, виявлено перспективи кожного схемного рішення. Запропоновано кожухопластинчастому модель теплообмінника у якості конденсатора-випарника каскадної машини CO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>.*

## SUMMERY

*Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is a modern material that is used in various spheres of human activity in all states: gas, liquid, dry ice, and in recent years its popularity is only growing. The work presents a low-pressure liquefied CO<sub>2</sub> production facility. The choice of temperature regime, technological scheme of a cascade machine with a single-stage cycle in the lower and two-stage in the upper cascade is substantiated. The working substances of the upper cascade are ammonia, propane, and carbon dioxide. The characteristics of the cascades were compared, the operational capabilities of the working substances were evaluated, and the prospects of each circuit solution were identified. A shell-and-plate model of the heat exchanger as a condenser-evaporator of the CO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> cascade machine is proposed.*

## ЗМІСТ

Вступ .....	7
Розділ 1. Аналітична частина .....	9
1.1. Аналіз літературних даних з діоксиду вуглецю .....	9
1.2. Аналіз літературних даних з кожухопластинчастих апаратів .....	18
1.3. Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженого CO <sub>2</sub> та сухого льоду .....	20
Розділ 2. Теоретична частина.....	14
2.1. Визначення об'ємних та енергетичних характеристик каскадних машин.....	25
2.2. Розрахунки верхніх каскадів .....	27
2.3. Порівняльний аналіз характеристик циклів верхніх каскадів.....	33
2.4. Розрахунок кожухопластинчастого конденсатора-випарника з конденсацією R744 у пакеті пластин та кипінням R744 у просторі під кожухом.....	35
2.5. Техніка безпеки та особливості в обслуговуванні системи та обладнання для CO <sub>2</sub> .....	41
Розділ 3. Економічні показники роботи .....	50
3.1. Розрахунок вартості науково-дослідницької кваліфікаційної роботи магістра .....	50
3.2. Розрахунок вартості досліджень і розробок.....	53
Висновки.....	55
Література .....	56

					<i>КРМ.КТ.1.631-03.1.28</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Петюх І.В.</i>			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Морозюк Л.І.</i>			6	58	
<i>Керівние</i>					<b>ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА</b>  <i>2 курс КТ-262м2 група</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Затверд.</i>							

## ВСТУП

### Актуальність теми

Сьогодні відомо безліч різноманітних газів. Деякі з них формуються самі в результаті реакцій, а деякі гази народжуються у природі. До основних таких газів природного походження відносять діоксид вуглецю CO<sub>2</sub>. Рідка вуглекислота широко застосовується в харчовій промисловості для газування фруктових і мінеральних вод, шампанського, використовується для гасіння пожеж, застосовується в зварювальному виробництві в якості флюса та інше.

Розвиток промисловості в сучасному світі потребує збільшеної кількості зрідженого CO<sub>2</sub>. Існуючі методи зберігання зрідженого CO<sub>2</sub> базуються на використанні малих резервуарів (балонів) високих тисків, до 6,0-7,0 МПа. Схемні і циклові рішення холодильних машин для отримання зрідженого CO<sub>2</sub> за такими параметрами мають багаторічну історію. На сучасному рівні розвитку холодильної техніки з'явилися технології зберігання CO<sub>2</sub> за низькими температурами та тисками у резервуарах великої ємності. Розвиток компресоробудування для CO<sub>2</sub> робочої речовини йде шляхом створення різних типів компресорів від малої до великої об'ємної продуктивності, високих тисків, без змащування, з регулюванням продуктивності. Наявність на ринку холодильної техніки вказаних компресорів спонукає до розробки нових схемних рішень низькотемпературних холодильних машин для отримання зрідженого CO<sub>2</sub>, зберігання та транспортування його при низьких тисках та температурах тривалий час без значних втрат. Враховуючи викладене, тема роботи є актуальною.

**Мета та задачі дослідження.**

**Мета роботи** – енергетичний аналіз схем і циклів низькотемпературних машин з отриманням зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз сучасних схем та циклів отримання зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску;
- розробити схеми та цикли каскадних машин для виробництва зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску;
- здійснити розрахунок енергетичних характеристик циклів, обраних для аналізу;
- провести порівняльний аналіз енергетичних та конструктивних характеристик обраних машин;
- провести теплотехнічний аналіз кожухопластинчастого конденсатора випарника CO<sub>2</sub>=CO<sub>2</sub>.

**Об'єктом дослідження** є схеми машин для виробництва зрідженого діоксиду вуглецю низького тиску.

**Предметом дослідження** є термодинамічні процеси, що здійснюються в елементах машини.

**Методи дослідження:** термодинамічний аналіз і числове моделювання термодинамічних процесів в елементах машини. Основою математичного моделювання є рівняння класичної термодинаміки та теплопередавання.

**Фактологічною основою** є підручники, навчальні посібники, матеріали фірм-виробників, які містяться на відповідних інтернет-сайтах, періодичних технічних виданнях та ін.

**Структура роботи.** Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури. Зміст роботи викладено на 58 сторінках, включаючи 19 рисунків, 11 таблиць, список інформаційних джерел з 18 найменувань.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1. Аналіз літературних даних з діоксиду вуглецю

Діоксид вуглецю в об'ємі промислового виробництва розглядають як робочу речовину холодильних машин та теплових насосів та продукт технологічного процесу отримання зрідженого CO<sub>2</sub> та «сухого льоду».

Основні переваги CO<sub>2</sub> *як робочої речовини* позначені у порівнянні з існуючими альтернативами [1].

У холодильних машинах з CO<sub>2</sub> в якості робочої речовини реалізуються одноступеневі, двоступеневі, каскадні цикли з процесами у транскритичній і двофазній областях.

Одноступеневі холодильні машини з транскритичним циклом CO<sub>2</sub> використовують як середньотемпературні. Вони працюють ефективно, якщо температура навколишнього середовища стабільна і вище критичної температури CO<sub>2</sub>. Одноступеневі машини з транскритичним циклом працюють як високотемпературні у транспортних системах кондиціонування повітря [2].

Розподіл температурних режимів і схемно-циклових рішень з урахуванням об'ємних, масогабаритних і енергетичних характеристик компресорів, що комплектують машини, здійснюється між багатоступеневими машинами з однією робочою речовиною і каскадних, що працюють з двома і більше робочими речовинами.

Двоступеневі холодильні машини використовують в супермаркетах для досягнення в охолоджуваному обладнанні двох рівнів температур [3].

У каскадних машинах CO<sub>2</sub> використовують як у верхньому, так і в нижньому каскаді. При використанні CO<sub>2</sub> в нижньому каскаді можна створювати високоефективні машини до -50°C. При використанні CO<sub>2</sub> в верхньому каскаді можна створювати низькотемпературні машини з вуглеводнями в нижньому каскаді до -80°C.

Робочими речовинами в каскадних машинах переважно служили R12 і R22 у верхньому високотемпературному каскаді (ВК) і R13, R14 – в низькотемпературному нижньому каскаді (НК). З погляду споживчих характеристик машини (холодопродуктивності та споживаної потужності) пари речовин задовольняли вимогам енергозбереження в холодильній техніці.

У 2006 році нормативно регулюючі органи ЄС прийняли «норми щодо F-газів», щоб звести до мінімуму ризик, що виходить від певної групи фторованих парникових газів, серед яких найбільш важливими є гази HFC, які зазвичай використовуються як робочі речовини.

На початку 2015 року набули чинності переглянуті норми щодо F-газів. Ці норми заохочують розробку обладнання, що використовує робочі речовини з нижчими показниками CO<sub>2</sub> – еквіваленту. Іншими словами, обладнання з більш низьким GWP робочої речовини або меншою його заправкою, але в ідеалі мета полягає у зниженні обох показників (також відомому як звичайно відомий «поступове припинення» використання HFC, що виражається у вигляді CO<sub>2</sub>-еквівалентів). Завдяки переглянутим нормам щодо F-газів, їх викиди в ЄС до 2030 року будуть скорочені на дві третини порівняно з рівнями 2014 року.

Такі вимоги спричинили пошук нових пар робочих речовин для каскадних машин, що відповідають спільним вимогам енергозбереження та екологічної безпеки, для забезпечення температур в об'єктах від -110 до -50°C.

Науково-технічна інформація про створення нового покоління каскадних холодильних машин та пошук нових робочих речовин для них міститься у роботах останнього десятиліття. Найбільш відомою та вивченою є машина з парою речовин R717/R744 (аміак – у ВК, діоксид вуглецю – у ПК). Термодинамічний аналіз складного циклу машини встановив, що перспективною областю при температурах в об'єктах, що охолоджуються є від -50 до -30 °C [4–6]. Машини випускають у промисловому масштабі провідні світові фірми. Поряд з R717/R744 у роботі розглядається і можлива заміна R717 на R290 (пропан), R1270 (пропілен) та R404A. Використання R744 як

робочої речовини ВК було відхилено через високі робочі тиски при реалізації циклу в надкритичній області.

На противагу цьому, у роботі [7] подано термодинамічний аналіз каскадної машини з речовинами. R744/R290, причому R744 пропонується як робоча речовина ВК з циклом в надкритичній області. Автори роботи [7] вважають головними перевагами пари таке: обидві речовини натуральні, мають нульові значення ODP і близькі до нуля GWP, забезпечують температурний рівень від -60 до -30 °С. У роботі наведені розрахункові параметри складного циклу при вирішенні енергетичної задачі, тобто визначення максимального коефіцієнта перетворення COP машини в залежності від проміжної (граничної) температури  $T_{ки}$  між ВК і Н.

У роботі [8] представлений аналіз кількох пар речовин, у яких робочою речовиною ВК служить R744. У ПК пропонується використовувати групу речовин HFC-типу (R125, R41, R32 і R23), що забезпечує отримання температур нижче температури потрійної точки R744. Такі речовини можуть бути використані для проектування каскадних холодильних машин з температурами нижче -70°C.

Цікавою, з погляду схемно-циклового рішення каскадної холодильної машини, є робота [9]. У ній розглянуто використання R744 одночасно в обох каскадах. ВК працює за надкритичним циклом, ПК – за циклом в області температур нижче за потрійну точку (trans – triplecycle). Дроселювання в ПК здійснюється в двофазну зону 'пар – тверде тіло' з осадженням сухого льоду всередині випарника. Сухий лід сублимує при контакті з електричними резисторами, а каскадна машина працює безперервно зі стабільним температурним режимом у випарнику нижче -56,6.

Роботи показують, що сучасні каскадні холодильні машини повинні використовувати натуральні робочі речовини, які відповідають усім вимогам екологічної безпеки. "Фаворитом" серед усіх пропонованих робочих речовин є R744. Різні дослідники пропонують використовувати цю робочу речовину як у

верхньому, так і нижньому каскаді холодильної машини, залежно від температурних меж реалізації циклу.

Реалізація ідей каскадних машин з R744 тривалий час не відбулася через відсутність машинобудівної бази для холодильних компресорів високого тиску. Нині компресори випускають у промисловому масштабі провідні світові фірми [10].

Компанія Carrier Transicold з 2013р. виготовляє холодильні системи (середньотемпературні) NaturaLINE CO<sub>2</sub>, які встановлюються на 40-футових рефрижераторних контейнерах. Цикл такої машини реалізується у транскритичній області. Робоча температура кипіння може сягати -22°C.

Реалізація у верхньому каскаді транскритичного циклу R744 сприяє створенню каскадних машин широкого спектра сфер застосування.

Слід зазначити, що наукова пропозиція автора вказаної роботи може бути використаною і для машин з отриманням зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску. При цьому вирішується проблема отримання чистого харчового продукту та створення машин малої продуктивності.

Для реалізації циклів з високими робочими тисками сучасні фірми-виробники випускають спеціальне обладнання: компресори малої, середньої і великої продуктивності 25...100 кВт і високими робочими тисками 40...150 бар, теплообмінні апарати з тиском 100...1000 бар.

*Діоксид вуглецю як продукт технологічного процесу, отримання зрідженого CO<sub>2</sub> та «сухого льоду»* використовують у харчовій промисловості та торгівлі, у транспортних засобах для перевезення заморожених продуктів. Причому сухий лід використовують як охолоджуючий засіб, так і бактерицидний. Важливе значення має CO<sub>2</sub> в технології зварювання. Він запобігає впливу зовнішнього повітря на метал, що зварюють. Металургійна промисловість стала однією з важливих споживачів CO<sub>2</sub>. Нове призначення отримав CO<sub>2</sub> у медицині у зв'язку з появою ліків, що потребують зберігання при температурах -80°C.

Класифікують CO<sub>2</sub> на ринку продукції так [1]:

- *газоподібний* (I сорт; II сорт високої чистоти 3.5; високої чистоти 4.0; високої чистоти 4.5; високої чистоти 5.0; вищий сорт).

- *рідкий* (I сорт; II сорт високої чистоти 3.5; високої чистоти 5.0; вищий сорт харчова (Євростандарт).

На частку CO<sub>2</sub> припадає 10% всього ринку технічних газів, що ставить цей продукт в один ряд з основними продуктами розділення повітря.

### **Отримання** [1].

У лабораторних умовах невеликі кількості отримують взаємодією карбонатів і гідрокарбонатів з кислотами, наприклад, мармуру, крейди або соди з соляною кислотою. Використання реакції сірчаної кислоти з крейдою або мармуром призводить до утворення малорозчинного сульфату кальцію, який заважає реакції, і який видаляється значним надлишком кислоти.

Для приготування напоїв може бути використаною реакція харчової соди з лимонною кислотою або з кислим лимонним соком. Саме в такому вигляді з'явилися перші газовані напої. Їх виготовленням і продажем займалися аптекарі.

Головним способом виробництва CO<sub>2</sub>, в тому числі як цільового продукту, є спалювання органічного палива – вугілля, природного газу, мазуту і отримання діоксиду вуглецю з димових газів з подальшим його очищення від шкідливих домішок.

Основними джерелами виробництва CO<sub>2</sub> є технологічні гази, такі як димовий газ, генераторний газ, який є продуктом газифікації бурого вугілля, синтез-газ – продукт газифікації вугілля й вуглеводневих газів та біогаз. Отримання CO<sub>2</sub> з цих газів є енергоємними процесами.

Якщо розглянути харчову промисловість то значні обсяги CO<sub>2</sub> виникають на виробництвах, де використовуються процеси бродіння рослинної сировини.

Зокрема такі процеси використовуються в спиртовій, пивній та виноробній галузях. В цих виробництвах CO<sub>2</sub> є побічним продуктом при

виробництві цільової харчової продукції. В спиртовій та пивній галузях для вловлювання викидів CO<sub>2</sub> розроблені та експлуатуються спеціальні технології.

Роботу деяких підприємств та виробництв електроенергії супроводжують значні викиди CO<sub>2</sub>. До таких підприємств відносяться ТЕС, які виробляють електричну та теплову енергію. Викиди CO<sub>2</sub>, наприклад, тільки від ТЕС України, в атмосферу Землі оцінюються майже в 100 млн т на рік.

Незалежно від джерела CO<sub>2</sub> існують проблеми, які необхідно враховувати під час його утилізації з газових сумішей, наприклад, димових газів. Крім того, слід приймати до уваги устаткування, яке використовується, його довершеність і ефективність технологій вилучення CO<sub>2</sub>.

З урахуванням викладеного важливо під час вилучення з димових газів CO<sub>2</sub> і отримання товарного продукту здійснювати підбір абсорбенту, що забезпечує значне покращення техніко-економічних показників установки в цілому.

Відомі три основні технічні рішення здобування чистого діоксиду вуглецю при спалюванні різних типів палива як вугілля, так і природного газу.

На багатьох підприємствах експлуатують вуглекислотні установки для отримання зрідженого низькотемпературного діоксиду вуглецю з димових газів. Такі установки підрозділяють в залежності від способу отримання вихідної сировини. Наприклад, CO<sub>2</sub> отримують з продуктів згоряння природного газу, з продуктів бродіння спиртових підприємствах, з газів, що відходять з аміачного виробництва

У всіх випадках розроблені установки здатні гарантувати високу якість отриманого CO<sub>2</sub>. Провідними фірмами по виробництву устаткування для отримання низькотемпературного CO<sub>2</sub> з димових газів є «Asco carbon dioxide LTD. Union Engigeering. Tecno Industriale s.r.l. та ін.

Отримання зрідженого CO<sub>2</sub> при спалюванні природного газу відносять до комерційних виробництв, в яких CO<sub>2</sub> є продуктом.

На рис.1.1 наведено одну з технологічних схем виробництва зрідженого CO<sub>2</sub>: повітря і природний газ подають в пальник, спеціально розроблений для спалювання природного газу з мінімальним коефіцієнтом надлишку повітря, встановлений на генераторі CO<sub>2</sub>. При спалюванні утворюється димовий газ, що складається з діоксиду вуглецю, азоту і водяної пари, тепло витрачається на кип'ятіння водного розчину моноетаноламіна (МЕА). З камери згоряння димові гази проходять в охолоджувач (скруббер), де їх промивають і охолоджують при прямому контакті з охолоджувальною водою до температури абсорбції 38...40°C.

При промивці від домішок частково конденсуються пари води.

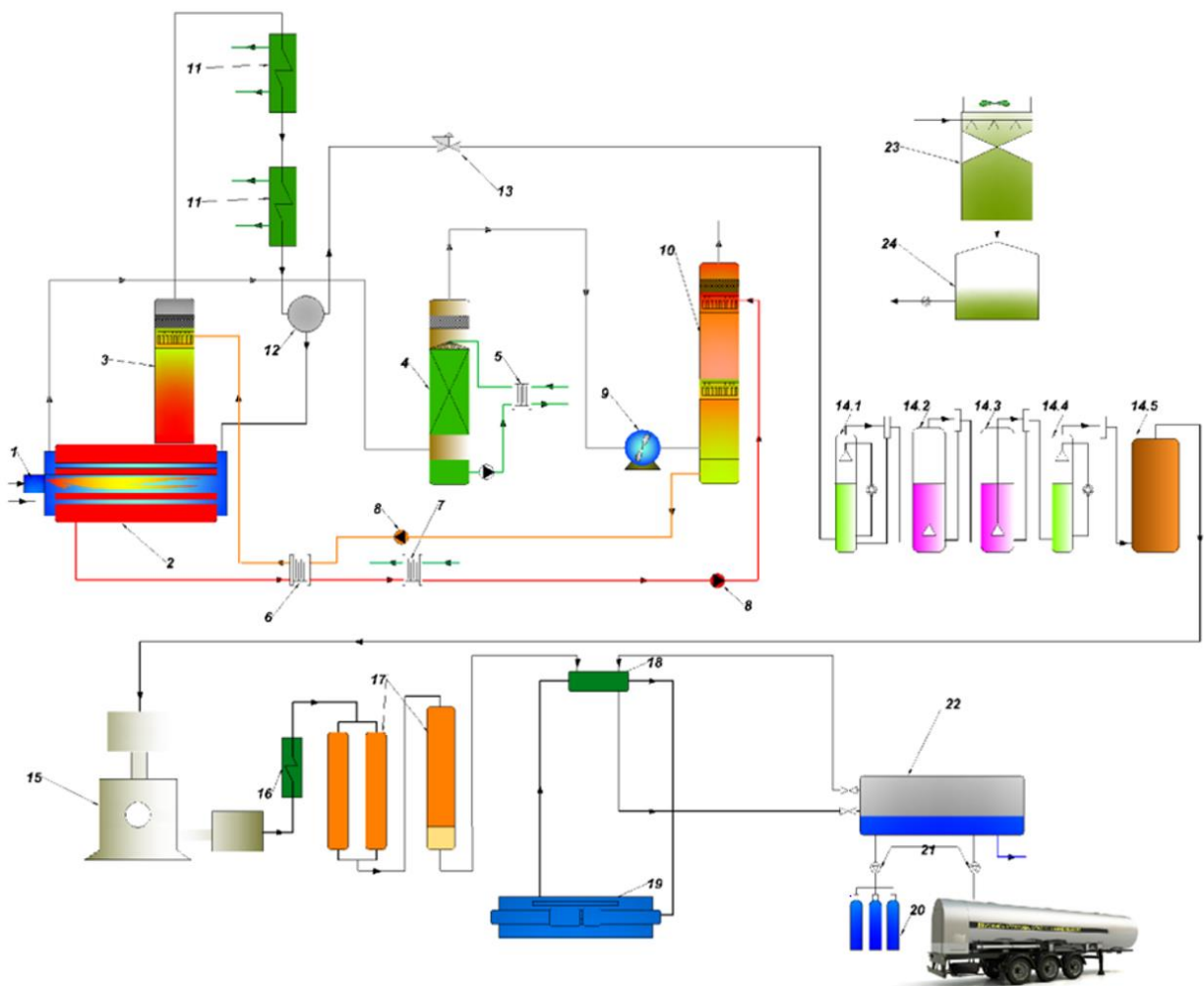


Рис.1.1. Технологічна схема отримання зрідженого CO<sub>2</sub> [11]

У колоні абсорбера CO<sub>2</sub> поглинається з димових газів розчином моноетаноламіна (МЕА). Решту газів (N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) викидають в атмосферу.

З абсорбера насичений розчин МЕА (збагачений CO<sub>2</sub>) перекачується в колону десорбера. Перед десорбером насичений розчин підігрівають за рахунок теплообміну з слабким розчином в теплообміннику розчину. У колоні десорбера здійснюється процес тепломасообміну між парою, що надходить з генератора і насиченим розчином МЕА. Суміш отриманого діоксиду вуглецю і водяної пари охолоджується у холодильнику газу. Холодильник газу складається з двох послідовно встановлених апаратів. У першому за ходом газу теплообміннику підігрівається вода до необхідної температури 60...80°C, а в другому – відбувається повне охолодження діоксиду вуглецю до необхідної температури 35°C.

Тепло використовують для виробництва гарячої води або опалення, що істотно підвищує енергоефективність виробництва. Система очищення при низькому тиску служить для видалення слідів МЕА. В системі використовуються скрубери і барботери для промивання газоподібного діоксиду вуглецю водою і розчином KMnO<sub>4</sub> і адсорбер низького тиску з активованим вугіллям.

Очищений газоподібний CO<sub>2</sub> стискається компресором без змащення циліндрів, спроектованим і виготовленим з матеріалів, спеціально призначених для роботи з насиченим вологою газоподібним CO<sub>2</sub>. Стиснутий CO<sub>2</sub> після кінцевого холодильника компресора охолоджується в додатковому холодильнику холодною водою і після відділення краплинної вологи подається в блок осушення CO<sub>2</sub>, який складається з двох адсорберів, що по черзі перемикаються для регенерації. Регенерація адсорбенту проводиться нагрітим сухим CO<sub>2</sub>. Для очищення від запахів встановлено адсорбер з активованим вугіллям. Осушений і очищений продукт подається в конденсатор-випарник, де газ конденсується за тиском 1,8...2,0 МПа.

Аналізуючи наведену технологію, слід звернути увагу на те, що ілюстративний матеріал на рис.1.1 не акцентує на технологічній схемі

холодильної машини. закінчуючи виходом з установки газоподібного CO<sub>2</sub>. Устаткування для зрідження автори не наводять. Виходячи з цього, проведемо термодинамічний аналіз циклів, які потенційно можуть забезпечити отримання зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску.

## 1.2. Аналіз літературних даних з кожухопластинчастих апаратів

Кожухопластинчастий теплообмінний агрегат являє собою гібридний варіант, який представляє ідеальне поєднання переваг пластинчастого теплообмінника і кожухотрубного. Сукупність цих факторів веде до зменшення площі теплообміну, компактності апарату, зниження його ваги і вартості, зниження вартості і часу обслуговування.

Теплообмінник складається з кожуха, в якому розміщений пакет пластин. Пакет пластин прикріплюється до кожуха, на якому розташовані приєднувальні патрубки, через які одне із середовищ надходить в пакет пластин. Теплообмінні процеси в даному апараті здійснюються на гофрованій поверхні теплопередавальних пластин, що утворюють паралельні канали складної форми, за якими рухаються гарячі і холодні потоки робочих речовин.

Максимальний рівень теплопередавання досягається шляхом впровадження гофрованих профілів, що турбулізують рухомі потоки. Висока турбулізація потоку не допускає підвищеного відкладення на стінки пластин.

Галузі застосування даної теплообмінної системи визначається його конструкцією підвищеної міцності. Такі установки застосовуються:

1. У системах централізованого тепlopостачання в якості конденсатора і випарника.
2. Для комплексів обігріву та охолодження масла.
3. У ролі економайзера і рекуператора для утилізації газів.
4. У схемах, що мають великі і асиметричні потоки рідких робочих речовин.
5. У великій теплоенергетиці, хімічній, нафтовій, металургійній і газовій промисловості.

Переваги теплообмінників: висока швидкість потоків в каналах, низькі тверді відклади на теплообмінній поверхні, висока густина теплового потоку, малі температурні напори, низькі масогабаритні характеристики конструкції, високі тиски та низькі температури.

***Енергозберігаючі рішення на базі кожухопластинчастих теплообмінників.***

Питанням енергозбереження та енергоефективності сьогодні приділяється велика увага. Ця тенденція продиктована постійно зростаючими цінами на енергоносії та посиленням конкурентної боротьби. Промислові підприємства шукають можливість скоротити свої виробничі витрати для зниження собівартості продукції, яку вони випускають.

### 1.3. Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженого CO<sub>2</sub> та сухого льоду

Для отримання сухого льоду відомі цикли, технічні характеристики яких наведено у енциклопедичних довідниках.

З інформаційних даних бачимо, що у всіх циклах високого тиску працюють триступеневі машини, вихід сухого льоду однаковий, а за енергетичною ефективністю є малоефективними. Цикли середнього та низького тисків реалізують в каскадних холодильних машинах, в верхніх каскадах використовують аміак. Вихід сухого льоду максимальний, цикли мають високу енергетичну ефективність. В каскадних циклах відведення тепла в нижньому каскаді здійснюється за невисокими тисками, близькими до потрібної точки, тому витрата енергії тут найменша. Каскадні цикли наведено на рис.1.2 та 1.3 в діаграмах стану  $p-h$ .

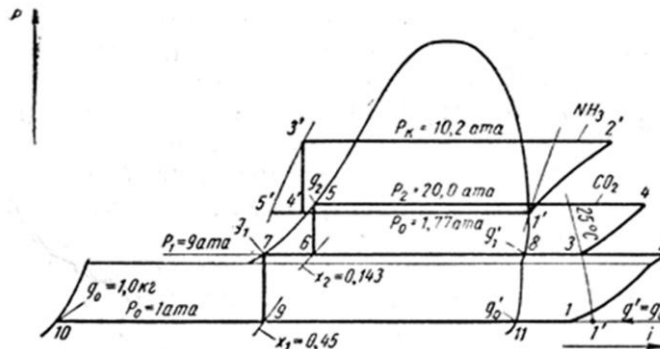


Рисунок.1.2. Отримання сухого льоду, цикл каскадної машини з двоступеневим нижнім каскадом та проміжним тиском 9,0 МПа

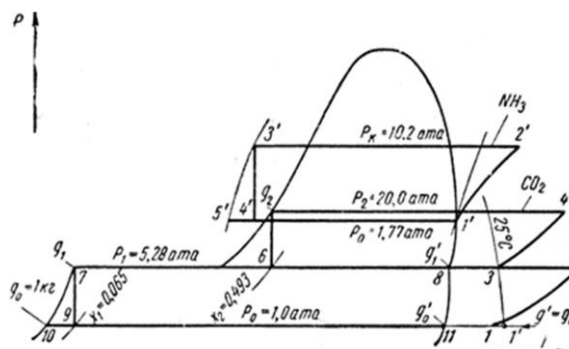


Рисунок 1.3. Отримання сухого льоду, цикл каскадної машини з двоступеневим нижнім каскадом та проміжним тиском 5,28 МПа

З діаграм видно, що в обох циклах конденсатор-випарник каскадної машини працює за тиском 2,0 МПа конденсації у нижньому каскаду. Такі умови є основою для побудови циклу виробництва зрідженого CO<sub>2</sub> за умови  $p_{зр}=2,0$  МПа та  $T_{зр}=-20^{\circ}\text{C}$ . Нижній каскад працює за двоступеневим стисненням, верхній – одноступеневим. Цикл нижнього каскаду машини зрідження надано на рис.1.4.

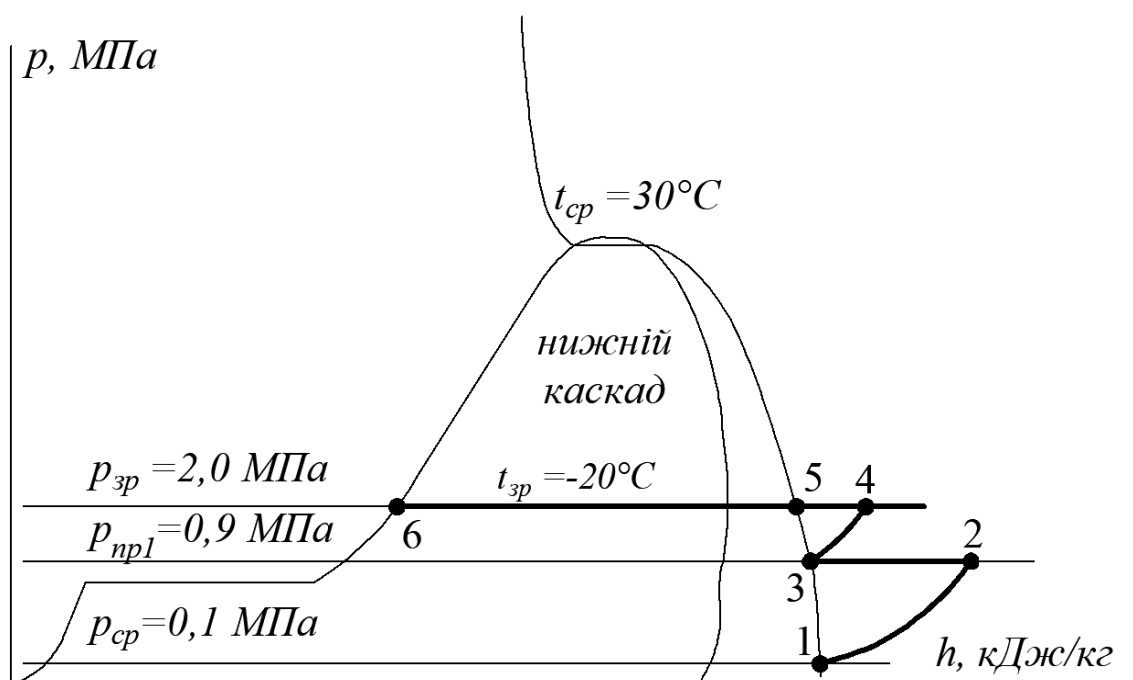


Рисунок 1.4. Розімкнутий двоступеневий цикл нижнього каскаду за умови:

$$p_{зр}=2,0 \text{ МПа і } T_{зр}=-20^{\circ}\text{C}$$

Продовжуючи аналіз, звертаємо увагу на те, що двоступеневі цикли нижніх каскадів працюють за різними проміжними тисками 9,0 МПа та 5,28 МПа. Це спонукає до створення схемно-циклового рішення з одноступеневим стиснення у нижньому каскаді в інтервалі тисків  $p_k/p_o=0,9/0.1$  (рис.1.5).

У такому випадку верхній каскад повинен працювати в інтервалі температур:  $T_k=30^{\circ}\text{C}$  і  $T_o=-45^{\circ}\text{C}$ . Відповідно до теорії холодильної техніки такий інтервал температур може бути реалізованим у каскадних двоступеневого стиснення для забезпечення високої енергетичної ефективності.

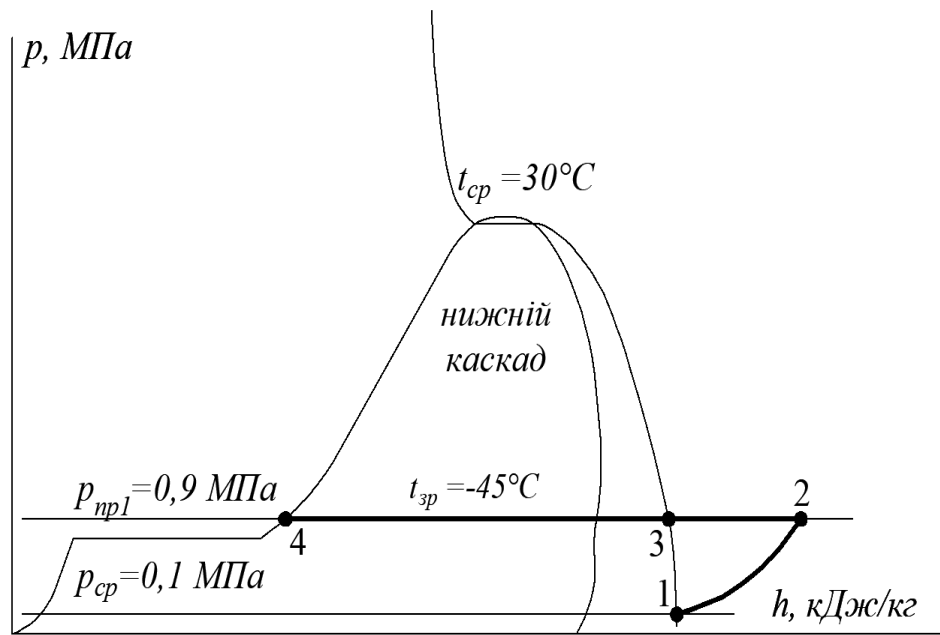


Рисунок 1.5. Розімкнутий цикл нижнього каскаду одноступеневого стиснення

Спираючись на сучасні дослідження каскадних холодильних машин, пропонуємо у верхньому каскаді використовувати двоступеневі машини з холодоагентами: аміак, пропан та CO<sub>2</sub>, а схемні рішення – в залежності від теплофізичних властивостей холодоагентів.

Принципові схеми та цикли машин надано на рис. 1.6 – 1.8.

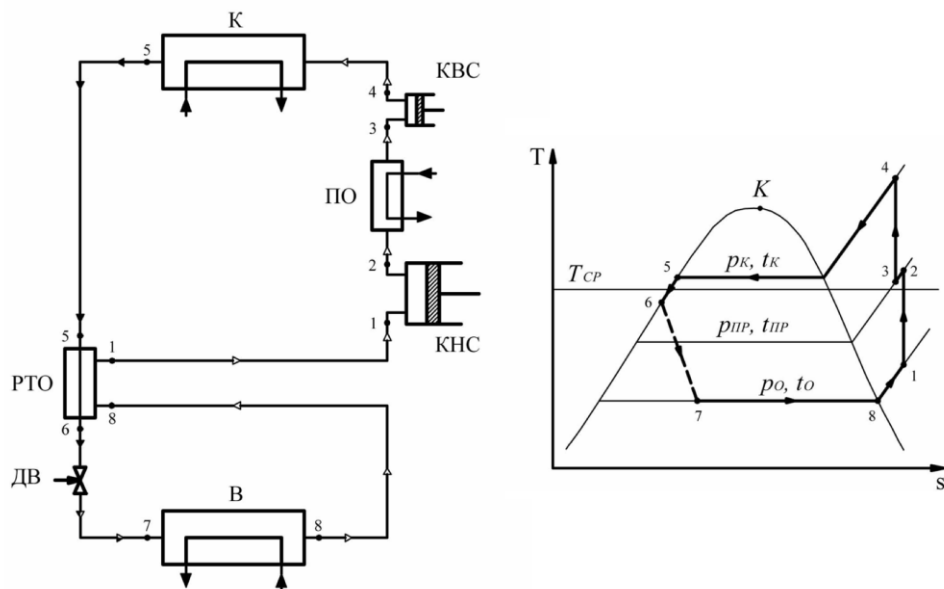


Рисунок 1.6. Схема та цикл машини верхнього каскаду з пропаном у якості робочої речовини [12]

Принципова схема (рис.1.6) складається з двох компресорів, що працюють послідовно, з проміжним охолодженням холодоагенту між ними, конденсатора, випарника, РТО та дросельного устрою.

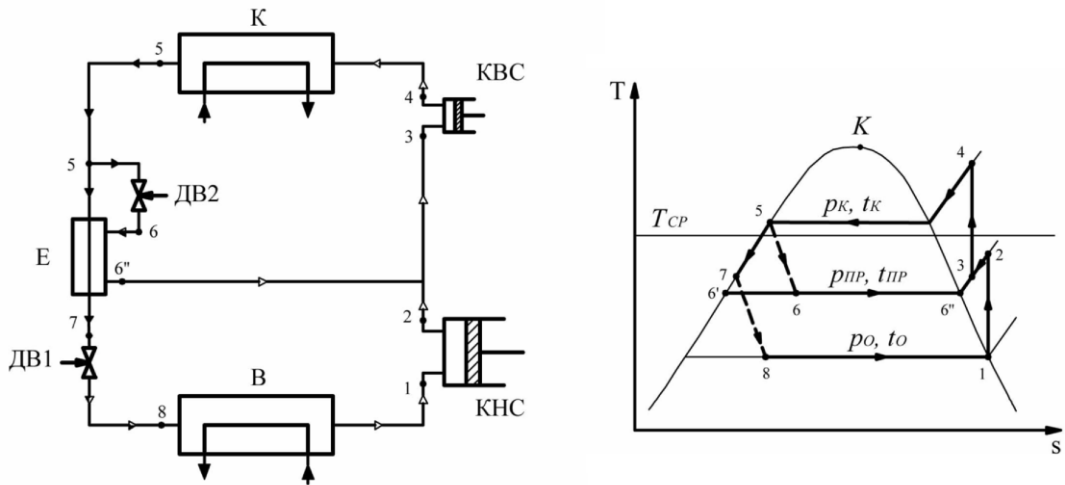


Рисунок 1.7. Схема та цикл машини верхнього каскаду з аміаком у якості робочої речовини [12]

Принципова схема (рис.1.7) містить систему економайзера, що забезпечує переохолодження рідини після конденсатора та проміжного охолодження холодоагенту після першого ступеня стиснення. Процес забезпечено теплообміном між рідиною високого тиску та киплячим агентом проміжного тиску.

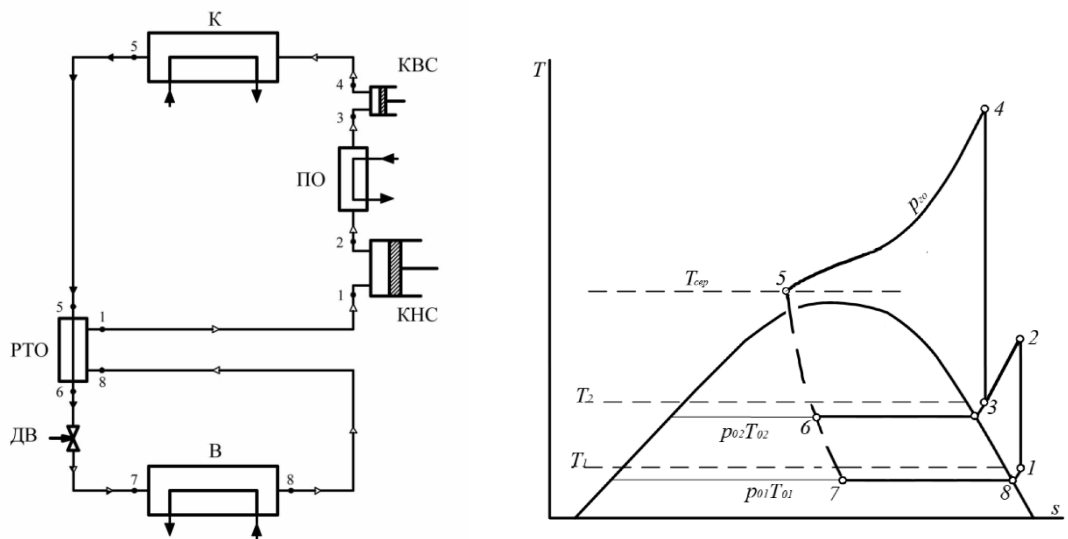


Рисунок 1.8. Схема та цикл машини верхнього каскаду з CO<sub>2</sub> [12]

Принципова схема (рис.1.8) не відрізняється від схеми з пропаном, цикли відрізняються згідно до особливостей теплофізичних властивостей робочих речовин. Машина з CO<sub>2</sub> реалізує цикл у транскритичній області, чим забезпечує працездатність при температурах навколишнього середовища вище критичної для CO<sub>2</sub>. Усі схеми працездатні і використовуються у промисловому секторі. Проведемо енергетичний аналіз циклів машин у режимах роботи верхніх каскадів машин для виробництва зрідженого CO<sub>2</sub>.

## РОЗДІЛ 2.

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1. Визначення об'ємних та енергетичних характеристик каскадних машин

Розрахунки здійснено у такій послідовності:

- розрахунок циклу нижнього каскаду з CO<sub>2</sub> (єдиний режим для усіх машин);
- розрахунок верхнього каскаду з аміаком у якості робочої речовини;
- розрахунок верхнього каскаду з пропаном у якості робочої речовини;
- розрахунок верхнього каскаду з CO<sub>2</sub> у якості робочої речовини;

Отримані характеристики машин віднесено до 1кг/с витрати CO<sub>2</sub> у нижньому каскаді.

#### *Розрахунок нижнього каскаду [13]*

Вихідні дані для розрахунку

Температура зрідженого CO<sub>2</sub>  $T = -30^{\circ}\text{C}$ ;

Тиск зрідженого CO<sub>2</sub>  $p_{зр} = 1,6 \text{ МПа}$ ;

Тиск газу на всмоктуванні  $p = 0,17 \text{ МПа}$ ;

Температура газу на всмоктуванні  $T = 30^{\circ}\text{C}$ .

Схема нижнього каскаду до розрахунку та термодинамічний цикл у діаграмі  $p=h$  надано на рис.2.1.

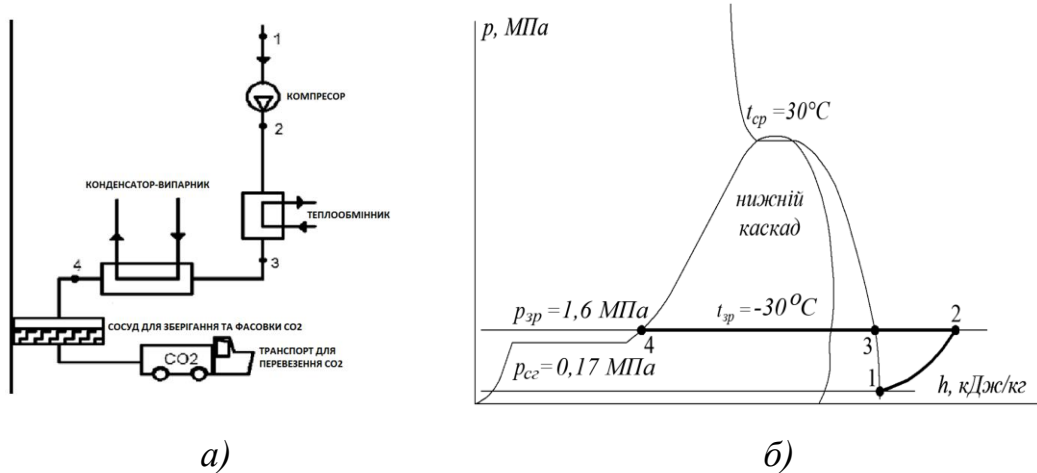


Рисунок 2.9. Схема(а) та цикл (б) нижнього каскаду у діаграмі  $p=h$

Таблиця 2.1. Параметри у вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці виміру	Точки				
		1	2	3	4	5
Тиск, $p$	МПа	0.17	1,6	1,6	1,6	1,6
Температура, $t$	°С	30	120	30	-30	-30
Ентальпія, $h$	кДж/кг	737	807	729	360	36089
Об'єм, $v$	м3/кг	0,5		-	-	

*Споживчі характеристики циклу*

Масова витрата робочої речовини у нижньому каскаді  $M_{HK} = 1,0$  кг/с.

Теплове навантаження на конденсатор-випарник

$$Q_{oHK} = M_{HK}(h_3 - h_5) = 1.0(729 - 360) = 369 \quad (1)$$

Адіабатна потужність компресора

$$N_{aHK} = M_{HK}(h_2 - h_1) = 1.0(807 - 737) = 70 \quad (2)$$

Індикаторна потужність компресора

$$N_{iHK\varepsilon} = N_{aHK} / \eta_i = 70 / 0,81 = 86.4 \quad (3)$$

Ефективна потужність компресора

$$N_{eHK} = N_{iHK} / \eta_i = 86.4 / 0.9 = 96 \quad (4)$$

## 2.2. Розрахунки верхніх каскадів [13]

### 2.2.1. Розрахунок верхнього каскаду з аміаком у якості робочої речовини

Вихідні дані для розрахунку

Температура кипіння  $T = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Температура конденсації  $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$ .

Проміжний тиск згідно до вирішення енергетичної задачі  $p = (p_k/p_0)^{0,5}$

Температура перегріву пари на всмоктуванні 5 град

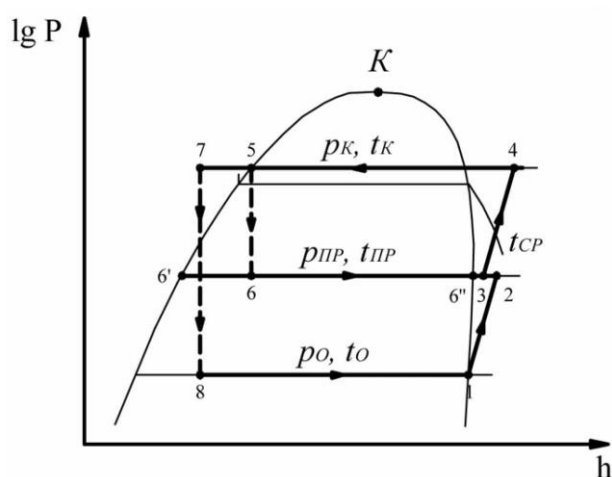


Рисунок 2.10. Цикл двоступеневої машини з аміаком=холодоагентом у діаграмі  $p=h$

Таблиця 2.2. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці виміру	Точки							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Тиск, $p$	бар	0,715	2,89	2.89	11,9	11,9	2,90	11,9	0,715
Температура,	$^\circ\text{C}$	-35	56	15	128	30	-10	0	-40
Ентальпія, $h$	кДж/кг	1419	1606	1523	1748	340	340	167	167
Об'єм, $v$	м3/кг	1.59	0.73	0.478	0,168-	-	-	-	-

Проміжний тиск між ступенями

$$p_{np} = (p_k p_0)^{0,5} = (0.715 \cdot 11.7)^{0,5} = 2.89 \quad (5)$$

Температуру в точці 7 прийнято  $t_7 = 0^{\circ}\text{C}$

Витрата холодоагенту через економайзер з теплового балансу

$$b = (h_5 - h_7) / (h_{3''} - h_5) = (340 - 167) / (1420 - 340) = 0,16 \quad (6)$$

Масова витрата холодоагенту через компресор першого ступеня з теплового балансу конденсатора-випарника

$$M_{BK1} = M_{HK} q_K^{HK} / q_0^{BK} = 1 \cdot 369 / (1419 - 167) = 0,295 \quad (7)$$

Масова витрата холодоагенту через компресор другого ступеня

$$M_{BK2} = M_{BK1} + b = 0,295 + 0,295 \cdot 0,16 = 0,34 \quad (8)$$

Адіабатна потужність компресора першого ступеня

$$N_{aBK1} = M_{BK1} (h_2 - h_1) = 0,295(1606 - 1419) = 117 \quad (9)$$

Адіабатна потужність компресора другого ступеня

$$N_{aBK2} = M_{BK2} (h_4 - h_3) = 0,34(1748 - 1523) = 76,5 \quad (10)$$

Ефективна потужність компресора першого ступеня

$$N_{e1} = N_{a1} / \eta_i \eta_m = 117 / 0,8 \cdot 0,9 = 162,5 \quad (11)$$

Ефективна потужність компресора другого ступеня

$$N_{e2} = N_{a2} / \eta_m \eta_i = 76,5 / 0,83 \cdot 0,9 = 102 \quad (12)$$

Загальне енергоспоживання машини на аміаку

$$\sum N_{ei} = N_e^{HK} + N_{e1}^{BK} + N_{e2}^{BK} = 96 + 162 + 102 = 360 \quad (13)$$

Коефіцієнт продуктивності холодильної машини зрідження

$$1 / COP = \frac{\sum N_{ei}}{Q_k^{HK}} = \frac{360}{369} = 0,98 \quad (14)$$

Загальна теоретична об'ємна продуктивність компресорів верхнього каскаду

$$V_{h717} = M_1 v_1 / \lambda_1 + M_2 v_3 / \lambda_2 = 0,295 \cdot 1,59 / 0,88 + 0,34 \cdot 0,478 / 0,88 = 0,71 \quad (15)$$

## 2.2.2. Розрахунок верхнього каскаду з пропаном у якості робочої речовини

Вихідні дані для розрахунку

Температура кипіння  $T = -40^{\circ}\text{C}$ ;

Температура конденсації  $T = 30^{\circ}\text{C}$ ;

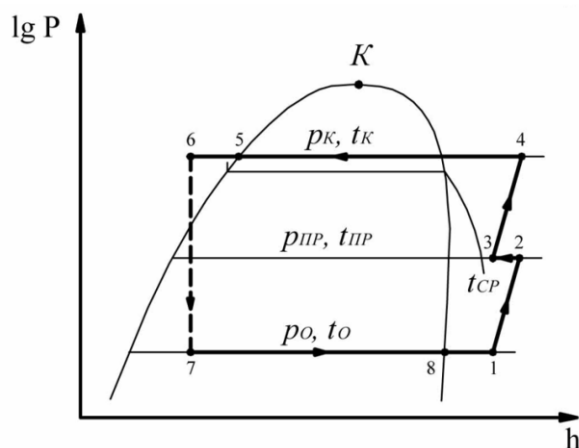


Рисунок 2.11. Цикл двоступеневої машини з пропаном-холодоагентом у діаграмі  $p=h$

Особливості циклу полягають у тому, що в циклі відсутній процес охолодження пропану між ступенями. Пропан має температури нагнітання близькими до температури навколишнього середовища, тому введення проміжного охолодження не сприяє підвищенню енергетичної ефективності машини або технічно неможливо.

Проміжний тиск між ступенями визначено згідно до рішення енергетичної задачі

$$p_{np} = (p_k p_0)^{0.5} = (1,1 \cdot 10,76)^{0.5} = 3,44 \quad (16)$$

Таблиця 2.3. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірюв.	Точки					
		1	2	3	4	5	6
Тиск, $p$	Мпа	0,11	0,34	0,34	1,076	1,076	0,07

Температура,	°С	0	39,3	39,3	83	30	-40
Ентальпія, $h$	кДж/кг	589	649,3	649,3	715	277,7	277,7
Об'єм, $\nu$	м <sup>3</sup> /кг	0.457	0.163	0.163	0,057	-	-

### Споживчі характеристики машини

Масова витрата з теплового балансу конденсатора-випарника

$$M_{HK} q_K^{HK} = M_{BK} q_0^{BK} \quad (17)$$

$$M_{BK} = M_{HK} q_K^{HK} / q_0^{BK} = 1 \cdot 369 / (589 - 278) = 1,186 \quad (18)$$

Адіабатна потужність компресора першого ступеня

$$N_{aBK} = M_{BK} (h_2 - h_1) = 1,186(649 - 589) = 71,2 \quad (19)$$

Адіабатна потужність компресора другого ступеня

$$N_{aBK} = M_{BK} (h_4 - h_3) = 1,186(715 - 649) = 78,2 \quad (20)$$

Ефективна потужність компресора першого ступеня

$$N_{iHK} = N_{aHK} / \eta_i \eta_m = 71 / 0,8 \cdot 0,9 = 98,6 \quad (21)$$

Ефективна потужність компресора другого ступеня

$$N_{eHK} = N_{iHK} / \eta_{mp} = 78,2 / 0,9 \cdot 0,88 = 98,8 \quad (22)$$

Загальне енергоспоживання машини на пропані

$$\sum N_{ei} = N_e^{HK} + N_{e1}^{BK} + N_{e2}^{BK} = 96 + 98,8 + 98,6 = 293 \quad (23)$$

Коефіцієнт продуктивності холодильної машини зрідження

$$1 / COP = \frac{\sum N_{ei}}{Q_k^{HK}} = \frac{293}{369} = 0,795 \quad (24)$$

Загальна теоретична об'ємна продуктивність компресорів верхнього каскаду

$$V_{h290} = M_{KB} (\nu_1 / \lambda_1 + \nu_3 / \lambda_2) = 1,186 \cdot (0,457 / 0,85 + 0,163 / 0,88) = 0,86 \quad (25)$$

### 2.2.3. Розрахунок верхнього каскаду з CO<sub>2</sub> у якості робочої речовини

Вихідні дані для розрахунку

Температура кипіння-  $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Температура навколишнього середовища  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Тиск у газовому охолоджувачі  $p = 9,0\text{ МПа}$

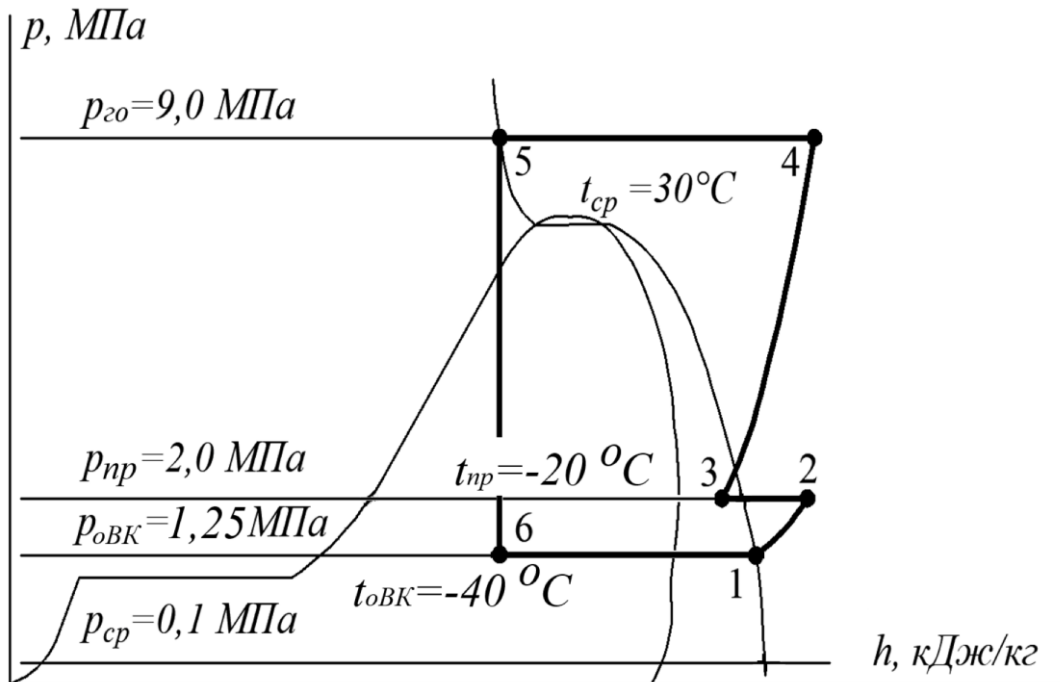


Рисунок 2.12. Цикл двоступеневої машини з CO<sub>2</sub>-холодоагентом у діаграмі  $p=h$

Таблиця 2.4. Параметри в вузлових точках циклу

Номер точки	тиск, $p$ , МПа	Температура, $T$ , $^{\circ}\text{C}$	Ентальпія, $h$ , кДж/кг	Питомий об'єм $v$ , м <sup>3</sup> /кг
1	1.25	0	695 166	0,4
2	2,0	170	712 170	
3	2,0	30	693 730	0,025
4	9,0	140	190 796	
5	9,0	30	490 117	
6	1,25	-40	490	

Масова витрата з теплового балансу конденсатора-випарника

$$M_{HK} q_K^{HK} = M_{BK} q_0^{BK} \quad (26)$$

$$M_{BK} = M_{HK} q_K^{HK} / q_0^{BK} = 1 \cdot 369 / (695 - 490) = 1,8 \quad (27)$$

Адіабатна потужність компресора першого ступеня

$$N_{aBK} = M_{BK} (h_2 - h_1) = 1,8(712 - 695) = 30,6 \quad (28)$$

Адіабатна потужність компресора другого ступеня

$$N_{aBK} = M_{BK} (h_4 - h_3) = 1,8(796 - 693) = 113 \quad (29)$$

Ефективна потужність компресора першого ступеня

$$N_{iHK} = N_{aHK} / \eta_i = 30,6 / 0,8 \cdot 0,9 = 42,5 \quad (30)$$

Ефективна потужність компресора другого ступеня

$$N_{iHK} = N_{aHK} / \eta_i = 113 / 0,82 \cdot 0,9 = 153 \quad (31)$$

Загальне енергоспоживання машини на пропані

$$\sum N_{ei} = \cdot N_e^{HK} + N_{e1}^{BK} + N_{e2}^{BK} = 96 + 42,5 + 153 = 291 \quad (32)$$

Коефіцієнт продуктивності холодильної машини зрідження

$$1 / COP = \frac{\sum N_{ei}}{Q_k^{HK}} = \frac{291}{369} = 0,79 \quad (33)$$

Загальна теоретична об'ємна продуктивність компресорів верхнього каскаду

$$V_{h744} = M_{KB744} (v_1 / \lambda_1 + v_3 / \lambda_2) = 1,8 \cdot (0,4 / 0,9 + 0,025 / 0,82) = 0,855 \quad (34)$$

### 2.3. Порівняльний аналіз характеристик циклів верхніх каскадів

Порівняльний аналіз проведено для масогабаритних характеристик компресорів, коефіцієнта продуктивності машини зрідження та енергоспоживання машини у цілому. Графічна інтерпретація надана на рис.2.13-2.15.

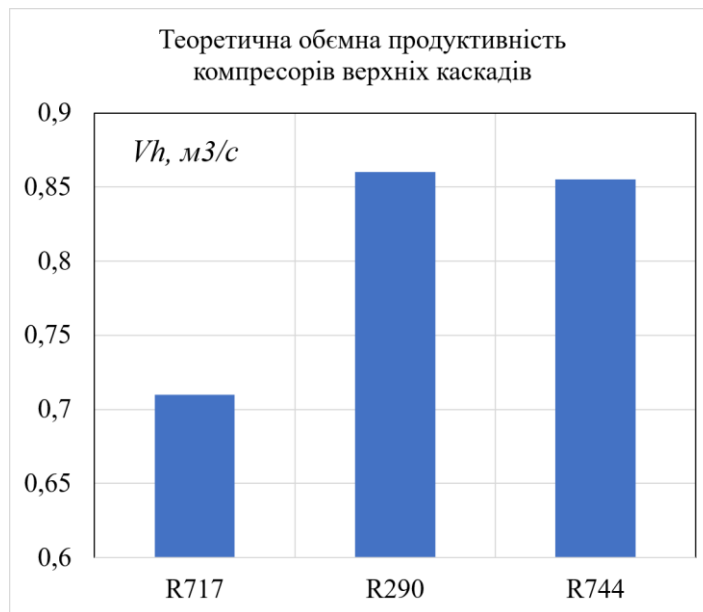


Рисунок.2.13. Порівняльний аналіз масогабаритних характеристик компресорів верхнього каскаду



Рисунок.2.14. Порівняльний аналіз Коефіцієнт продуктивності холодильної машини зрідження

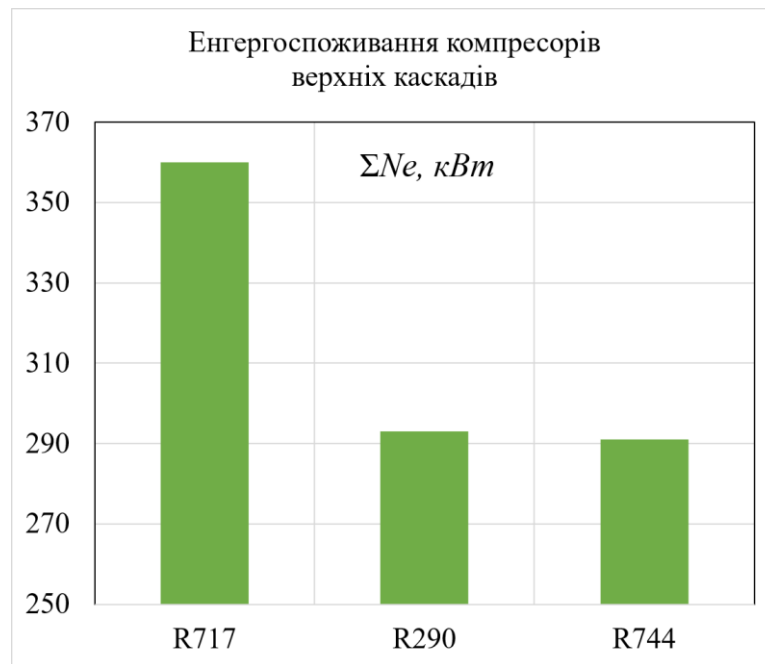


Рисунок.2.15. Порівняльний аналіз енергоспоживання компресорів верхнього каскаду

Результати аналізу свідчать, що масогабаритні характеристики компресорів з R717 кращі за масогабаритні характеристики R290 та R744. Різниця становить 20%. У той же час енергетичні характеристики відрізняються на 25%. Вибір холодоагента верхнього каскаду буде цілком залежить від споживача. Коефіцієнт зрідження у R290 та R744 однаковий і кращий за R717 на 25%. Використання єдиного холодоагенту у обох каскадах робить великі переваги каскаду CO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>. Компресори усіх верхніх каскадів можуть бути обраними серійними від головних виробників холодильного обладнання в світі.

## 2.4. Розрахунок кожухопластинчастого конденсатора-випарника з конденсацією R744 у пакеті пластин та кипінням R744 у просторі під кожухом [14.15]

У холодильних установках великої продуктивності переважно використовують кожухопластинчасті моделі у якості водяних конденсаторів або випарників з проміжним холодоносієм. В обох випадках фазові перетворення холодоагенту здійснюються у міжкasetному просторі під кожухом, чим забезпечено організацію парового простору для сепарації крапель рідини. У міжтрубному просторі підтримується постійний рівень киплячої рідини. Пропонується конструювати теплообмінник за принципом попередньої кожухотрубноної моделі: конденсація R170 у пакеті пластин та кипіння R290 у просторі під кожухом [14] Зразок кожухопластинчастого конденсатора-випарника надано на рис.2.16.

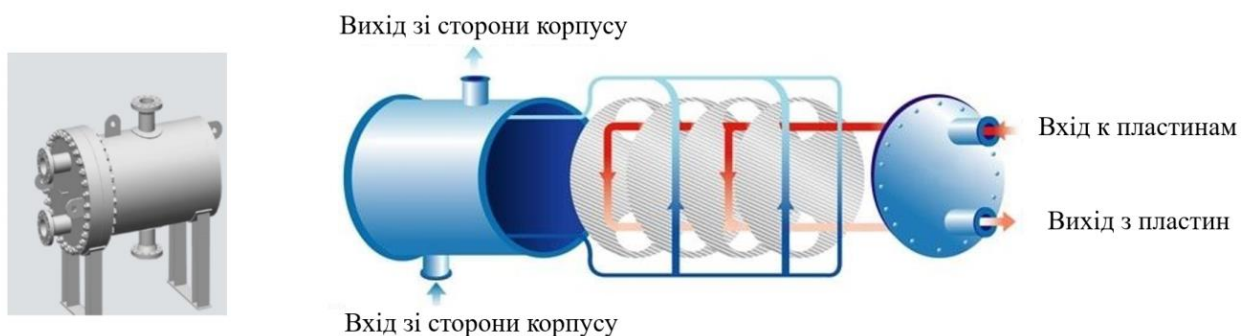


Рисунок 2.16. Конденсатор-випарник: загальний вигляд схеми організації потоків

Теплопередавальна поверхня кожухопластинчастого теплообмінника складається із штампованих гофрованих пластин. Стінки, зварені між собою по периметру, утворюють два контури каналів складної форми, герметичних і чергуються. Максимальний рівень теплопередавання досягається шляхом впровадження гофрованих профілів, що турбулізують природним рухомі потоки. Рух носіїв може здійснюватися прямо- та протитечією, або перехресно.

Вихідні дані для розрахунку:

Температура конденсації R744  $T_{кHK} = -30^{\circ}\text{C}$ ;

Температура кипіння R744  $T_{oBK} = -40^{\circ}\text{C}$ ;

Масова витрата R744  $M_{HK} = 1,0 \text{ кг/с}$

Масова витрата  $M_{BK} = 1,8 \text{ кг/с}$

Геометричні характеристики пластин:

Діаметр пластин  $a = 500 \text{ мм}$ ;

Товщина пластини  $\delta = 1 \text{ мм}$ ;

Ширина каналу  $u = 3 \text{ мм}$ .

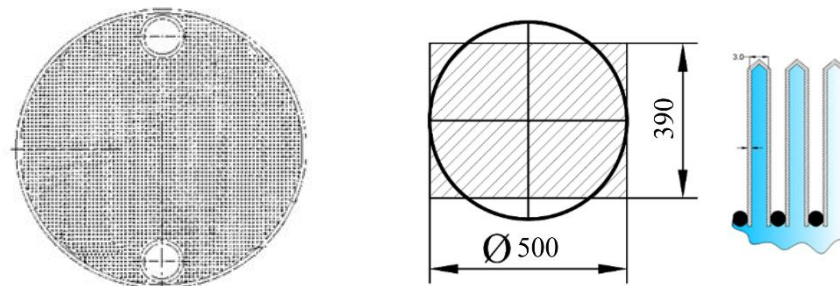


Рисунок 2.17. Характеристика теплообмінної поверхні

Теплообмінна поверхня однієї пластини:

$$f_{1n} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 2 = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{2} = 0,393, \text{ м}^2 \quad (35)$$

Умовна висота прямокутної пластини, теплообмінна поверхня якої дорівнює пластині, що має форму кола, і ширину, що дорівнює діаметру, становить

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} = y \cdot D \Rightarrow y = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} = 0,39 \text{ м}$$

Живий перетин однієї касети:

$$f_{1к} = D \cdot u = 0,5 \cdot 0,003 = 0,0015 \text{ м}^2 \quad (36)$$

Таблиця 2.5. Теплофізичні властивості CO<sub>2</sub> на лінії насичення при  
T=-40...-30°C

Параметр	ознака	Одиниці виміру	значення	
			Рідина	Пара
Динамічна в'язкість	$\nu$		71*10 <sup>-8</sup>	
Теплопровідність	$\lambda$	Вт/(м·К);	0,158	
Густина	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1140	
Теплоємність	$c$	кДж/(кг·К);		
Питома теплота пароутворення	$r$	кДж/кг;	331	
Тиск $p_k$		бар		

Коефіцієнт тепловіддавання при конденсації холодоагенту у вертикальних щілинних каналах

$$\alpha_k = 0.2 \cdot \alpha_{R744} \cdot Re^{0.12} \cdot Pr^{-0.33} = 0,2 \cdot 2535 \cdot 1,4^{-0.33} \cdot 439436^{0.12} = 2694\theta^{0,25} \quad (37)$$

Об'ємна витрата пари агентау:

$$V_{HK} = M_{HK} \cdot v_5 = 1/16,43 = 0,061 \text{ м}^3/\text{с} \quad (38)$$

Швидкість руху пари R744 на вході у канал

$$w_n'' = \frac{2 \cdot V_{TH}}{f_{1,k} \cdot n} = \frac{0,06 \cdot 2}{0,0015 \cdot 100} = 0,8, \text{ м/с} \quad (39)$$

$N = 100$  – кількість пластин в апараті

Критерій Рейнольдса:

$$Re_n = \frac{w_{ye}}{\nu} = \frac{0,8 \cdot 0,39}{71 \cdot 10^{-8}} = 439436 \quad (40)$$

Коефіцієнт тепловіддавання R744 для нерухомої пари на вертикальній стінці висотою  $y$

$$\alpha_{R744} = 0.725 \cdot \sqrt[4]{\frac{(g \cdot r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3)}{\mu \cdot \theta \cdot y}} = 0.725 \cdot \sqrt[4]{\frac{9.8 \cdot 331000 \cdot 1140^2 \cdot 0.158^3}{238 \cdot 10^{-5} \cdot \theta \cdot 0.39}} = 1491\theta^{0,25} \quad (41)$$

Таблиця 2.6. Густина теплового потоку в залежності від температурного напору

Θ	1	2	3	4
q	1491	2982	4257	5964

Для каналів, виконаних з пластин, середній коефіцієнт тепловіддавання на 70% вище, тоді:

$$\alpha_{R744} = 1491 \cdot 1.7 = 2535\theta^{-0,25}, \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (42)$$

Питомий тепловий потік:

Результати розрахунків густини теплового потоку в залежності від температурного напору надано у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Результати розрахунків тепловіддавання при конденсації R744 у вертикальних щілинних каналах

Θ	1	2	3	4
q	2535	4263	5772	7170

*Тепловіддавання при кипінні R744 [4,8]*

Коефіцієнт тепловіддавання при кипінні холодоагенту у вертикальних щілинних каналах визначається за рівнянням

$$\alpha = 3,0(\text{Re}'' )^{0,3} (\text{Bo})^{0,33} \frac{\lambda}{d_b} = 3,0 \cdot (922830)^{0,3} \cdot 25^{0,33} \cdot 0,158 / 0,006 = 14076 \quad (43)$$

Об'ємна витрата пари агента, що виходить з каналу:

$$V_{BK} = M_{BK} \cdot v_1 = 1./14,4 = 0,125 \text{ м}^3/\text{с} \quad (44)$$

Швидкість пари на виході з каналу в залежності від кількості пластин

$$w_a = \frac{2V_a}{f_{1,k} \cdot n} = \frac{0,125 \cdot 2}{0,0015 \cdot 100} = 1,66 \quad (45)$$

Критерій Рейнольдса

$$\text{Re}_n = \frac{w y_e}{\nu} = \frac{1,66 \cdot 0,39}{71 \cdot 10^{-8}} = 922830 \quad (46)$$

Критерій Бонда

$$Bo = g \rho d_b^2 / \sigma = 9,8 \cdot 114 \cdot 0,006^2 / 0,0163 = 24,67 \quad (47)$$

Питомий тепловий потік в залежності від температурного напору в апараті

$$q_a = \alpha_o \cdot \theta_o = 14072 \theta_o \quad (48)$$

Результати розрахунків густини теплового потоку у залежності від температурного напору надано у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8. Результати розрахунків тепловіддавання при кипінні *R744* у вертикальних щілинних каналах в залежності від напору

$\theta$	1	2	3	4
q	14072	28144		56288

Визначення густини теплового потоку в апараті в залежності від теплового напору графоаналітичним методом, надано на рис.2.18.

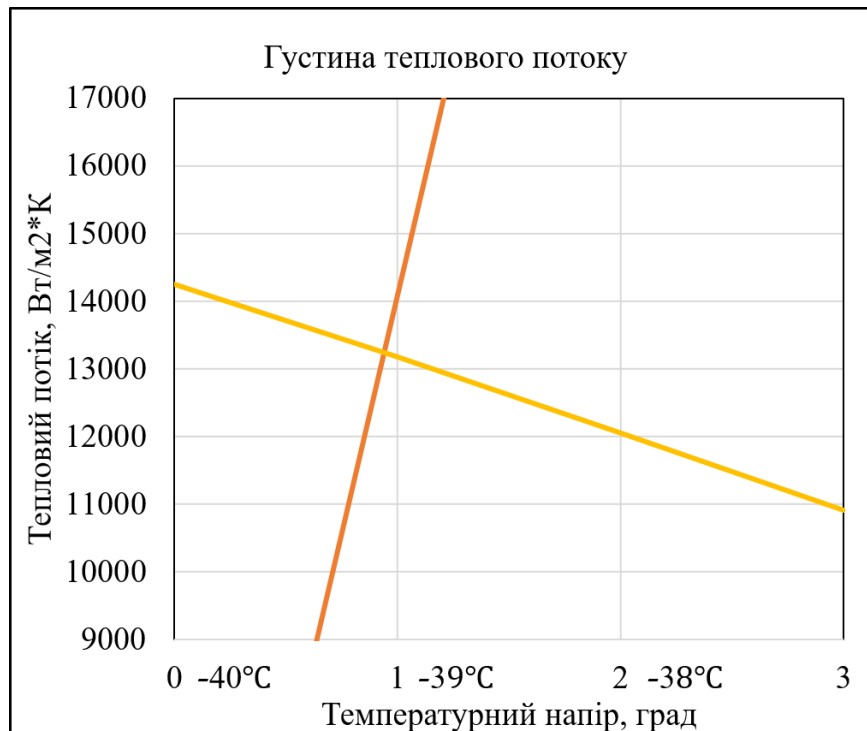


Рисунок 2.18. Графоаналітичний метод визначення густини теплового потоку в залежності від температурного напору  $\theta$  в апараті

Розрахунковий тепловий потік становить  $q=13200 \text{ Вт/м}^2$

Теплопередавальна поверхня апарату:

$$F = fn = 0.393 \cdot 100 = 39.3 \text{ м}^2 \quad (49)$$

Теплове навантаження на конденсатор-випарник

$$Q_{кв} = q_{кв} F = 13,2 \cdot 39,3 = 518 \quad (50)$$

Розрахункова поверхня перевищує потрібну на 30%, що створює можливість зменшити температурний напір в апараті.

На підставі отриманих результатів робимо висновок, що параметри конденсатора-випарника задовольняє блок з 100 пластин.

*Конструктивний розрахунок апарату*

Внутрішній діаметр кожуху	$D_{кож}=600 \text{ мм};$
Довжина блоку касет	$L= 102 \cdot 0,004=400 \text{ мм};$
Довжина апарату	$A=600 \text{ мм}.$
Об'ємні габарити апарату	$V=0,532 \text{ м}^3.$

## 2.5. Техніка безпеки та особливості в обслуговуванні системи та обладнання для CO<sub>2</sub>

*Основні технологічні та економічні переваги CO<sub>2</sub> перед іншими системами?*

- Холодильна система на CO<sub>2</sub> може забезпечувати підприємство не лише холодом, а й гарячим водопостачанням з температурою води до 80°C.
- Суттєве зменшення діаметрів трубопроводів системи.
- Низька ціна на CO<sub>2</sub>.
- CO<sub>2</sub> – вибухобезпечний, негорючий та відносно нетоксичний.
- Низький рівень шуму під час роботи компресорів.
- Зручно комбінувати контури системи із різними температурами кипіння.
- Зменшення споживання електроенергії у порівнянні з класичними системами в аналогічних умовах (залежить від умов роботи та концепції системи).
- *Особливості в обслуговуванні системи та обладнання для CO<sub>2</sub>.*

Додаткові знання та навички має володіти спеціаліст, що працює з таким обладнанням. Принципово обслуговування системи на CO<sub>2</sub> не відрізняється від обслуговування системи на інших холодоагентах. Відмінності в деталях, і спричинені вони фізико-хімічними властивостями CO<sub>2</sub>. Наприклад:

- для контролю роботи системи необхідна відповідна манометрична станція, розрахована на значно вищі тиски та із захисними кріпленнями рукавів;
- при розгерметизації системи (аварійній чи плановій, для проведення сервісних робіт) або під час заправки існує ризик утворення сухого льоду. Проведення подальших робіт та запуск системи неможливий, поки він повністю не випарується;
- після кожної розгерметизації елемента системи, в якому є ущільнююча прокладка, її необхідно замінювати на нову, оскільки вона стає непридатною для повторного застосування;

- контакт CO<sub>2</sub> із тілом людини може викликати термічний опік. Крім того, висока концентрація вуглекислоти в повітрі суттєво погіршує стан людини, тому важливо контролювати цей показник.

В цілому, технічний спеціаліст, який контролює роботу або обслуговує систему на CO<sub>2</sub>, зобов'язаний мати відповідну кваліфікацію, знати правила роботи та дотримуватись їх. Крім того, інженери сервісної компанії проводять попереднє навчання та інструктаж з технічними спеціалістами компанії-замовника.

*Які основні аргументи відмовитись від традиційних на користь CO<sub>2</sub>?*

Серед усіх холодильних агентів CO<sub>2</sub> – найперспективніший по таким параметрам:

- високі показники безпеки;
- мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище;
- високі теплофізичні показники;
- експлуатаційна економія;
- економічна життєздатність;
- наявність та доступність.

Враховуючи необхідність виведення із ужитку до 2030 холодоагентів, що негативно впливають на навколишнє середовище, у систем на CO<sub>2</sub> довготривала життєздатність в цих умовах.

До речі, згідно до статистичних даних Danfoss, середньорічні витрати холодоагенту в атмосферу складають близько 15% від маси заправки системи. Враховуючи, що для CO<sub>2</sub> GWP=1, тоді як для R507, наприклад, GWP=3900, вуглецевий слід та прямий вплив на навколишнє середовище у систем на CO<sub>2</sub> на декілька порядків менше, ніж у систем на ХФВ.

Якщо говорити про фінансову сторону використання систем охолодження на CO<sub>2</sub>, яка економія при її впровадженні та експлуатації?

При виборі оптимальних рішень в проекті, різниця в експлуатаційних затратах може складати до 15% на користь системи на вуглекислоті. При цьому вибір концепції системи, яка працює неефективно в конкретних умовах,

може призвести до суттєвих переplat на купівлю обладнання, затрати електроенергії, сервісне обслуговування, і врешті-решт система на вуглекислоті може стати не рішенням, а проблемою для замовника. Важливо здійснювати комплексний підхід до проектування будь-яких систем, враховувати максимальну кількість факторів та обирати оптимальне рішення, яке задовольнятиме конкретні технічні завдання.

В яких умовах використання такої системи виправдане, а в яких – ні?

Станом на 2021 рік в Україні, економічно доцільно використовувати системи на CO<sub>2</sub> з холодопродуктивністю не менше 75 кВт. Також необхідно обрати найбільш відповідну під конкретні умови концепцію системи. Взагалі, універсальних критеріїв, які визначають доцільність того чи іншого рішення, не існує. Необхідно саме порівнювати розрахункову продуктивність та економічну ефективність і приймати відповідне рішення.

*Які найпоширеніші побоювання споживачів стосовно використання систем CO<sub>2</sub>?*

Я б радше назвала це «міфами» або помилками, які легко розвінчуються, якщо розуміти технологію та специфіку роботи, технологічні процеси.

Міф № 3: установка та експлуатація системи CO<sub>2</sub> дорожча.

У більшості випадків каскадні системи з CO<sub>2</sub> дешевші в установці і експлуатації, ніж двоступеневі аміачні системи для низькотемпературних застосувань.

Унікальні фізичні властивості CO<sub>2</sub> також дають перевагу при використанні в якості вторинного холодоагенту для високотемпературних застосувань. Висока щільність пари і летючість в поєднанні дозволяють домогтися набагато менших вимог до насосів (для схем з насосною циркуляцією) і діаметрів трубопроводів у порівнянні з системами, які працюють на інших холодильних агентах, що знижує капітальні та експлуатаційні витрати.

При інвестуванні в нову систему охолодження, власники і оператори повинні розглянути можливість використання каскадних систем з CO<sub>2</sub> або насосно-циркуляційних систем. Незалежно від того, чи хочете ви мінімізувати обсяг аміаку, зменшити вуглецевий слід або і те, і інше, CO<sub>2</sub> часто є життєздатним і економічним варіантом, що забезпечує:

- економічну установку та експлуатацію;
- Підвищену енергоефективність в порівнянні з гліколем;
- Зниження витрат на заправку холодоагента;
- Холодоагент з нульовим потенціалом руйнування озонного шару (ODP) і 1 потенціалом глобального потепління (GWP).

### ***Правила експлуатації теплообмінного обладнання***

Експлуатація теплообмінників має на увазі чітке дотримання правил безпеки на всіх етапах. Проводити установку/демонтаж, обслуговування та ремонтні роботи повинні кваліфіковані фахівці, які знають конструкцію агрегату та вивчили експлуатаційну документацію. Попередньо вони проходять інструктаж з ТВ та атестацію.

Піднімати та переміщувати обладнання необхідно згідно з прописаними вимогами від компанії-виробника. Забороняється застосовувати шпильки, з'єднання та стяжні болти для підйому агрегату. В ході ТО задіяно справне та перевірене обладнання.

Категорично не допускається використовувати пристрій у заземлювальному контурі в процесі зварювання, встановлення та обслуговування.

Заборонено проводити ремонт у теплообмінниках, якщо у внутрішній порожнині агрегату є тиск або температурні показники його поверхні перевищують 45 градусів. Щоб запобігти можливості розбризкування нагрівального середовища при виході з ладу ущільнень пакета пластин, слід встановити на обладнання робочий екран.

Під час експлуатації теплообмінників слід дотримуватися кількох правил:

- У процесі монтажу необхідно передбачити вільний доступ до обладнання для реалізації оглядів, обслуговування та ремонту у майбутньому. Також важливо, щоб процес зняття пластин не викликав труднощів.
- Категорично забороняється спирати на теплообмінники трубопроводи, що під'єднуються. Для цього використовують підвіс чи сторонні опори.
- Бажано монтувати запобіжні клапани по обидва боки, які мають стійкість до випробувального тиску.
- Важливо дотримуватись відстань між рамою та врізкою для манометрів та термометрів, вона повинна бути не менше 10 см.
- Гідравлічні удари дуже впливають на конструкцію теплообмінників. Щоб їх запобігти, запуск теплообмінного апарату в роботу повинен проводитись кваліфікованим персоналом, який пройшов навчання.
- Система, до якої приєднані теплообмінники, не повинна мати перепаду тиску та температури. Під час використання слідкувати за показниками стрибків та фіксують їх у журнал. Зниження напору та теплової віддачі свідчить про наявність втрати пропускнуої спроможності контурів теплообмінника
- Періодичність очищення пластин визначає продуктивність теплообмінників. У процесі застосовують м'які засоби. У ході промивання пластинчастого агрегату важливо дотримуватись регламенту. З типу забруднень підбирається необхідний засіб. Щоб видалити олії та жири, використовують розчинник, необхідний для олійних емульсій. За наявності жирових або органічних відкладень застосовують гідроксид натрію.

## ***Система контролю і захисту від виникнення аварій і передаварійних ситуацій в холодильних машинах.***

Аварія – це небезпечна подія техногенного характеру, яка може призвести або спричинила загибель людей або створює загрозу життю і здоров'ю людей на об'єкті або окремій території і призводить до руйнування будівель, споруд, обладнання та транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу або завдає шкоди навколишньому середовищу.

Дії працівників в аварійних ситуаціях на холодильних установках регламентуються стандартною інструкцією:

- Визначення можливих сценаріїв виникнення надзвичайної ситуації та її розвитку;
- Визначення підготовки організації до локалізації та ліквідації аварійних ситуацій на холодильних установках;
- Планування дій виробничого персоналу та аварійних служб;
- Формування для локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій на відповідних етапах їх розвитку;
- Розробка заходів, спрямованих на підвищення протиаварійного захисту та зменшення масштабів наслідків аварій;
- Визначення адекватності вжитих заходів щодо запобігання аварійним ситуаціям на холодильних установках.

Інструкція є додатком до плану реагування на надзвичайні ситуації в організації (на об'єкті). Розробка інструкції може здійснюватися самостійно (працівниками організації) або із залученням фахівців, які мають досвід розробки декларацій промислової безпеки небезпечних виробничих об'єктів.

### ***Список можливих аварій та інцидентів***

Аварії та інциденти – це ситуації, при яких необхідно зупинити холодильну установку в екстремій ситуації. Вони підрозділяються на:

- Аварії, такі як вибух, пожежа, викид холодоагенту;
- Такі інциденти, як порушення параметрів технологічного процесу, розгерметизація обладнання з виділенням агенту, відключення електроенергії, переривання подачі холодоагенту, повітря;
- Відключення електрики і освітлення, припинення вентиляції;
- Порушення технологічного процесу або режиму роботи компресорів, посудин, що працюють під тиском, агрегатів, апаратів, комунікацій, пожежа від грозових розрядів і вторинних проявів блискавки та інші, які можуть призвести до аварії.

### ***Аварійний автоматичний захист***

Повинен відповідати вимогам чинних правил, нормативно-технічної документації, проектів, регламентів і забезпечувати задану точність підтримки технологічних параметрів, надійність і безпеку експлуатації холодильних систем.

Компресори повинні бути оснащені ПАЗ (аварійної автоматичної захистом), які спрацьовують за такими параметрами:

- За гранично допустимим значенням тиску нагнітання;
- За гранично допустимою температурою нагнітання;
- За гранично допустимою різницею тисків в системі змащення;
- За верхнім гранично допустимим рівнем рідини в апараті або посудині, з якого висмоктуються пари холодоагенту.

Значення гранично допустимих параметрів визначаються розробником проекту за даними науково-дослідних організацій, характеристиками засобів контролю, вимірювань і контролю, документації виробників обладнання.

Холодильні системи, оснащені двома і більше компресорами, що обслуговують кілька систем випаровування, повинні бути забезпечені пристроями для забезпечення зупинки всіх компресорів при спрацьовуванні реле рівня захисної рідини в посудині (апараті) будь-якої системи.

Досягнувши вищевказаних рівнів рідкого агенту в судинах і апаратах, автоматично вмикається світлова сигналізація, яка повинна забезпечуватися лампами таких кольорів:

- Червоний – сигнал про гранично допустимий рівень (передаварійна сигналізація);
- Жовтий – сигнал про небезпечне підвищення верхнього рівня (попереджувальний сигнал).

Включення сигнальної світлової та звукової сигналізації «Аварія» в диспетчерській:

- при перевищенні концентрації агенту в повітрі робочих зон холодильних камер і приміщень інших споживачів холоду величини ГДКр.з;
- відключення подачі агенту в контрольовані приміщення, якщо концентрація в них перевищує значення, рівне 3 ГДКр.з.

При цьому в приміщеннях виробничих цехів з холодильним обладнанням повинна бути включена витяжна вентиляція.

Всі параметри холодильної установки виводяться на монітор оператора. Досягнувши параметра попереднього аварійного значення, на екрані спрацює додаткова сигналізація, що попереджає про це. У такій ситуації холодильна настройка не буде зупинена, оператор на підставі отриманих даних сам вирішить, чи можна вирішити проблему без зупинки процесу або зупинити і повідомити про несправність відповідну службу і керівництво.

При отриманні повідомлення про надзвичайну ситуацію або нещасний випадок диспетчер зобов'язаний:

- Повідомити про це територіальні органи МНС, Проматомнагляд, місцевий виконавчий та адміністративний орган;
- Уточнити характер надзвичайної ситуації або аварії, можливі наслідки і зробити запис в журналі;

- Визначити напрямок вітру, зону можливих пошкоджень, розташування командного пункту і місця збору робочих організацій, попередити про необхідність виходу з небезпечної зони;
- Повідомити посадових осіб зі списку, вказавши місце розташування командного пункту;
- Викликати швидку допомогу;
- Повідомляти персонал інших цехів, яким загрожує можливість пошкодження, про необхідність покинути робочі місця і відправитися до визначеного ним місця збору;
- Викликати членів добровільної пожежної команди, які перебувають на зміні;
- До прибуття начальника ліквідації аварії вживати заходів щодо встановлення постів обмеження доступу людей і транспортних засобів до небезпечної зони;
- З'ясувати (за номерами) всіх працівників попереджених цехів, які покинули небезпечну зону;
- З'ясуйте хід аварійно-рятувальних робіт.

## ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ

### 3.1. Розрахунок вартості науково-дослідницької кваліфікаційної роботи магістра [18]

#### *Формування стрічкового графіку виконання роботи*

Плани підготовки магістерської роботи формують з використанням різних моделей, одна з яких стрічковий графік.

Стрічковий графік – графічна модель з переліком робіт, що виконуються, з зазначенням часу початку робіт, часу завершення робіт і тривалості всієї роботи. Формування стрічкових графіків вимагає розрахунків трудомісткості і тривалості кожної роботи і кількості виконавців. Для цих розрахунків потрібні нормативи трудомісткості виконання робіт, диференційованих за такими ознаками, як ступінь новизни, складності, формат креслень.

Перевагами стрічкового графіка є простота, наочність, можливість відображення змісту і багатьох організаційно – економічних характеристик робіт.

Загальний термін роботи – 3 місяці, з 11 вересня до 10 грудня 2022 року з урахуванням вихідних і святкових днів. Кількість робочих календарних днів за цей період склало 65 (5-ти денний робочий тиждень і свята).

На підставі даних таблиці 3.13. складемо календарний графік виконання робіт, що відображає тривалість кожного виду робіт у вигляді відрізків часу, які розташовуються відповідно до послідовності виконання робіт (рис.3.19).

Таблиця 3.9. Дані для створення стрічкового графіка

Стадія	Назва етапу роботи	Трудомісткість робіт (посада виконавців)	Тривалість, доба
1	Розробка та затвердження технічного завдання	Студент/ викладач	0/2
2	Вивчення технічного завдання	Студент/ викладач	5/0
3	Огляд і вивчення літератури	Студент/викладач	14/14
4	Розробка математичної моделі об'єкта	Студент/викладач	10/0
5	Вибір методу дослідження	Студент/викладач	0/2
6	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	Студент/викладач	2/0
7	Теплові і конструктивні розрахунки елементів об'єкта	Студент/викладач	35/0
8	Розробка креслень і графічних моделей	Студент/викладач	5/0
9	Аналіз результатів досліджень	Студент/викладач	2/2
10	Корекція моделей і алгоритмів, що використовуються	Студент/викладач	0/7
11	Оформлення пояснювальної записки	Студент/доцент	2/0
12	Обговорення та затвердження результатів роботи	Студент/викладач	2/2
13	Підготовка матеріалів роботи до захисту	Студент/викладач	2/0
Разом:			77/29

### Час роботи , дні

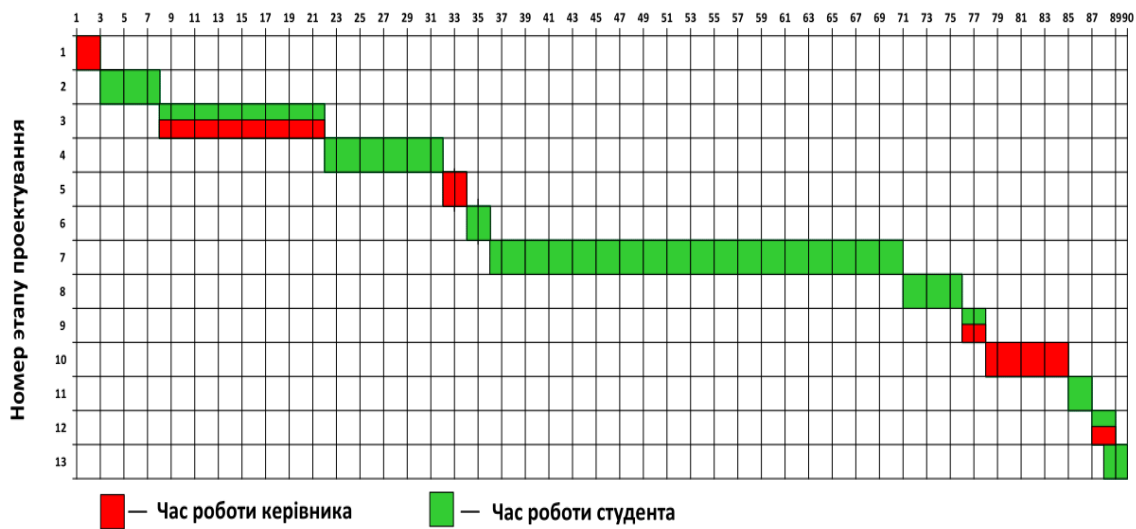


Рисунок 3.19. Стрічковий графік виконання роботи

### 3.2. Розрахунок вартості досліджень і розробок

Кошторис витрат на кваліфікаційну роботу являє собою вартісну оцінку використуваних у процесі виконання роботи матеріалів, енергії, основних фондів, трудових ресурсів, а також інших витрат на її створення та захист.

Витрати, що утворюють кошторис, групують відповідно до їх економічного змісту за такими елементами: матеріальні витрати; вартість робочої сили; амортизація основних засобів; інші витрати.

Таблиця 3.10. Перелік матеріальних витрат

Назва	Одиниці	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Канцелярські товари	шт.	5	20	100
USB флеш-пам'ять	шт.	1	350	350
Чорнило для лазерного принтера	шт.	1	250	250
Разом				70

Витрати на електроенергію включають до статті матеріальних витрат

$$B_{el} = N \cdot c_{el} \cdot \tau_g \quad (51)$$

де,  $N$  – енергоспоживання обладнання кВт/год;  $c_{el}$  – вартість 1 кВт.год, гривень;  $\tau_g$  – час використання обладнання під час робіт, год.

Для роботи використовували персональний комп'ютер потужністю 350 Вт і принтер потужністю 10 Вт. У ПІВМ є час: 50 днів, 6 годин на добу, принтера – 6 хвилин.

Вартість 1кВт електроенергії становить – 1,68 грн/кВт.

Вартість електроенергії становить:

$$B_{el} = 0,35 \cdot 1,68 \cdot 50 \cdot 6 + 0,01 \cdot 1,68 \cdot 0,1 \cdot 50 = 184 \text{ грн} \quad (52)$$

Загалом матеріальні витрати дорівнюють:

$$\sum B = B_m + B_{el} = 700 + 184 = 884 \text{ грн} \quad (53)$$

Витрати на заробітну плату включають заробітну плату керівника (доцента) і стипендію студента.

Заробітна плата нараховується, виходячи із ставки розробника і часу, що витрачається на виконання роботи.

Доцент має ставку 10981 гривень, студент має ставку 1800 гривень.

Виходячи з витрат часу на розроблення (керівник – 29 днів, студент – 77 днів), зарплата дорівнює:

$$z_{кер} = \frac{10981}{22} \cdot 29 = 14474,95 \text{ гр} - \text{зарплата керівника}; \quad (54)$$

$$z_{ст} = \frac{1800}{22} \cdot 77 = 6300 \text{ гр} - \text{зарплата студента}. \quad (55)$$

Витрати на заробітну плату:

$$\sum z = z_{кер} + z_{ст} = 14474,95 + 6300 = 20774,95 \text{ гр}. \quad (56)$$

Додаткова зарплата становить 15% від основної суми:

$$z_{дод} = \sum z \cdot 0,15 = 20774,95 \cdot 0,15 = 3116,24 \text{ гр}. \quad (57)$$

Фонд оплати праці:

$$\Phi_{зн} = z_{дод} + \sum z = 3116,24 + 20774,95 = 23891,191 \text{ гр}. \quad (58)$$

Загальні прямі витрати

$$\sum B_{пр} = \Phi_{зн} + \sum B = 23891,191 + 1235,2 = 25126,39 \text{ гр}. \quad (59)$$

Таблиця 3.11. Необхідні витрати

Назва витратних позицій	Сума, гривень.	Відсоток
Матеріальні витрати, $\sum B$	1235,2	5
Витрати на заробітну плату, $\Phi_{зн}$	23891,191	95
Загальна вартість, $\sum B_{пр}$	25126,39	

Орієнтовно вартість виконання магістерської роботи становить 25 тис грн.

## ВИСНОВКИ

1. На підставі огляду літератури встановлено, що для отримання зрідженого CO<sub>2</sub> низького тиску можна використовувати каскадні холодильні машини з CO<sub>2</sub> у нижньому каскаді та аміаком, пропаном та CO<sub>2</sub> у верхньому каскаді на засадах енергозбереження.
2. Проведено розрахунок енергетичних характеристик циклів, обраних для аналізу. Аналіз показав усі переваги кожного з циклів у певному блоці характеристик.
3. Встановлення в технологічну схему пластинчастого теплообмінника зменшує простір, що займає обладнання холодильної машини на 6 куб метрів.
4. Змінився термін ремонтних робіт, технологія очищення апарату, як наслідок, експлуатаційні витрати на апарат. Експлуатаційну надійність забезпечено вибором конструкційних матеріалів, організацією монтажу основного теплообмінного устаткування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Діоксид вуглецю [Електронний ресурс] <http://xn--80aimveh.pp.ua/nauka/2112-doksid-vuglecyu-formula-vlastivost-ta-oblast-zastosuvannya.html>.
2. Chen, Y. Carbon dioxide cooling and power combined cycle for mobile applications [Text]: paperpub. and pres. at 7 th IIR Gustav Lorentzen, Natural Working Fluids/ Y. Chen, P. Lundqvist – Trondheim, Norway, 2006. – 1273.
3. Honghyun, Cho. Theoretical analysis of performance of a two-stage compression CO<sub>2</sub> cycle with two different evaporating temperatures [Text] / Cho Honghyun, Park Chasik, Shin Eunsung // International Journal of Refrigeration. – 2014. – Vol. 47, Issue 11. – P. 164-175. Режим доступу: doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.07.024
4. Dopazo, A. Experimental Evaluation of a Cascade Refrigeration System Prototype with CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> for Freezing Process Application [Text] / A. Dopazo, J. Fernandez-Seara // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol. 34, Issue 1. – P. 257–267. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.07.010
5. Bingming, W. Experimental Investigation on the Performance of NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> Cascade Refrigeration System with Twin-Screw Compressor [Text] / W. Bingming, W. Huagen, L. Jianfeng, X. Ziwen // International Journal of Refrigeration. – 2009. – Vol. 32, Issue 6. – P. 1358–1365. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.03.008
6. Lee, T. Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> cascade refrigeration systems [Text] / T. Lee, C. Liu, T. Chen // International Journal of Refrigeration. – 2006. – Vol. 29, Issue 7. – P. 1100–1108. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.03.003
7. Sachdeva, G. Performance Study of Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants [Text] / G. Sachdeva, V. Jain, S. S. Kachhwaha // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2014. – Vol. 8, Issue 3.
8. Di Nicola, G. Blends of carbon dioxide and HFCs as working fluids for the low-temperature circuit in cascade refrigerating systems [Text] / G. Di Nicola, G.

Giuliana, F. Polonara, R. Stryjek // International Journal of Refrigeration. – 2005. – Vol. 28, Issue 2. – P. 130–140. –

Режим доступу: doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.06.014.

9. Yamaguchi, H. Investigation of dry ice blockage in an ultra-low temperature cascade refrigeration system using CO<sub>2</sub> as a working fluid [Text] / H. Yamaguchi, X.-D. Niu, K. Sekimoto, P. Neksa // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol. 34, Issue 2. – P. 466–475. –

Режим доступу: doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.11.001.

10. Bitzer K hlmaschinenbau GmbH. [Електронний ресурс] / Обзор хладагентов. – 2004 – № 13. А-501-13. – С. 36. – Режим доступа: <http://yкахолод.com.ua/file/Обзор.pdf>

11. Технологія виробництва рідкого діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>)

<http://plamya-co2.ua/tech2.html/>

12. Основи теплотехніки і гідравліки [Текст] : навч. посіб. / Б. Х. Драганов, А. В. Міщенко, Ю. О. Борхаленко ; за ред. Б.Х. Драганова. — Київ : Освіта, 2011. — 495 с. : іл., табл. ISBN 978-966-2007-18-3 <https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdOAH.BibRecord.43601>

13 Refrigeration and Air Conditioning [Електронний ресурс] / Indian Institutes of Technology. – Режим доступу: \www/URL: [http://nptel.iitk.ac.in/courses/ Webcourse contents/ИТ%20Кharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/ New index1.html](http://nptel.iitk.ac.in/courses/Webcoursecontents/ИТ%20Кharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/Newindex1.html) – 03.05.2013.

14. Kakac S., Hongtan L. , Pramuanjaroenkij A. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design: CRC Press is an imprint of Taylor Francis Group, 2002. 520 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420053746>

15. Вассерман, О. А. Технічна термодинаміка і теплообмін : підручник / О. А. Вассерман, О. Г. Слинько. - Одеса : Фенікс, 2019. - 496 с.

16. Техніка безпеки і охорона праці на підприємстві <https://remhouse.info/3797-tekhnika-bezpeky-okhorona-pratsi-na-pidpriemstvi.html>.

17. [https://techhorticulture.com/tehnologiyi-systemy-oholodzhennya-z-so2-v-  
agrarnomu-sektori-ta-rozvinchuvannya-mifiv-pro-jogo-vykorystannya/](https://techhorticulture.com/tehnologiyi-systemy-oholodzhennya-z-so2-v-<br/>agrarnomu-sektori-ta-rozvinchuvannya-mifiv-pro-jogo-vykorystannya/)

18. Стрічковий графік. [http://ni.biz.ua/3/3\\_9/3\\_99004\\_lentochniy-grafik.html](http://ni.biz.ua/3/3_9/3_99004_lentochniy-grafik.html).