

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи

На тему: «Термодинамічний аналіз каскадного циклу для низькотемпературного виробництва зрідженого діоксиду вуглецю»

Здобувача Кучменко А.І.
(прізвище, ініціали)

4 курсу ЕН-142 групи

Керівник доц. Грудка Б.Г.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: проф. Морозюк Л.І.
(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2026 р., протокол № _____

Завідувач кафедри КТ _____ **Юрій СИМОНЕНКО**

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ, КРІОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЕНЕРГЕТИКИ ІМ. В.С. МАРТИНОВСЬКОГО

Кафедра Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма Холодильні машини, установки
і кондиціонування повітря»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ

д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«__» ____ 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Кучменка Андрія Івановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Термодинамічний аналіз каскадного циклу для
низькотемпературного виробництва зрідженого діоксиду вуглецю

керівник роботи к.т.н., доц. Грудка Богдан Геннадійович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 31 жовтня 2025 року № 613-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 01 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: Установа для виробництва зрідженого діоксиду
вуглецю, температури зрідження -20 і -45 °С, масова витрата CO₂ в технологічному процесі 1 кг/с.
У верхньому каскаді використати дві природні робочі речовини: аміак і пропан.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Вступ. Теоретична частина. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Термодинамічний
аналіз циклів машин для отримання зрідженого CO₂ та сухого льоду. Тепловий розрахунок
холодильної машини. Тепловий розрахунок каскадної холодильної машини для виробництва
зрідженого CO₂ (-20°С і -45°С). Тепловий розрахунок конденсатора-випарника. Вибір компресорів
для каскадної холодильної машини. Техніка безпеки для роботи з каскадними установками.
Економічні показники роботи. Висновки. Література

5. Перелік графічного матеріалу:
Презентація Power Point (12 слайдів)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Проф. Морозюк Л.І.		

7. Дата видачі завдання _____ 01.12.2025 _____

Керівник _____ доц. Грудка Б.Г.
Завдання прийняв до виконання _____ Кучменко А.І.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і аналіз літератури	30 днів	
3	Розробка математичної моделі об'єкта	10 днів	
4	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	15 днів	
5	Теплові і конструктивні розрахунки елементів об'єкта	10 днів	
6	Розробка креслень і графічних моделей	20 днів	
7	Аналіз результатів досліджень	8 днів	
8	Оформлення пояснювальної записки	5 днів	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	5 днів	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	5 днів	

Здобувач-дипломник _____
(підпис)

Кучменко А.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Грудка Б.Г.
(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 _____
Кучменко А.І.
(ПІБ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Розвиток промисловості в сучасному світі потребує збільшеної кількості CO₂. На сучасному рівні розвитку холодильної техніки з'явилися технології зберігання CO₂ за низькими температурами та тисками у резервуарах великої ємності. Наявність на ринку холодильної техніки низькотемпературного обладнання дозволило розробку нових схемних рішень низькотемпературних холодильних машин для отримання зрідженого CO₂ та зберігання його за низькими тисками та температурами тривалий час без значних втрат. Враховуючи викладене, тема роботи є актуальною.

Мета роботи – розробка схемно-циклового рішення машини отримання зрідженого діоксиду вуглецю харчової чистоти з продуктів спалюваного природного газу. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: розроблено спосіб здійснення синтезу схемно-циклового рішення низькотемпературної машини середнього тиску, виконано енергетичний аналіз циклу каскадної машини, виконано вибір головного устаткування машини та системи зберігання зрідженого газу. Об'єктом дослідження є схема та цикл установки для отримання зрідженого CO₂. Предметом дослідження є термодинамічні процеси, які здійснюються в елементах машини. Наукова новизна дослідження полягає в розробці схеми та циклу низькотемпературної каскадної компресорної холодильної машини з натуральними холодоагентами в верхньому каскаді та різними температурними рівнями отримання зрідженого CO₂ у нижньому.

Спираючись на сучасні дослідження каскадних холодильних машин, запропоновано у верхньому каскаді два холодоагенти - аміак і пропан, а схемні рішення – одно- та двоступеневі в залежності від теплофізичних властивостей холодоагентів. У машині перевагу віддано кожухотрубному конденсатору-випарнику, який забезпечує високу енергетичну ефективність процесу теплопередавання і експлуатаційну надійність всієї холодильної установки

Розглянуто можливість компанувати агреатовану каскадну холодильну установку на основі поршневих компресорів, що працюють на CO₂ / аміаку в якості холодоагенту, застосовуючи CO₂ компресори без змащення для отримання чистого харчового CO₂

Ключові слова: низькотемпературна каскадна машина, зрідження CO₂, термодинамічний цикл, компресор без змащення

SUMMARY

The development of industry in the modern world requires an increased amount of CO₂. At the current level of development of refrigeration technology, technologies for storing CO₂ at low temperatures and pressures in large tanks have appeared. The availability of low-temperature refrigeration equipment on the market has allowed the development of new circuit solutions for low-temperature refrigeration machines to produce liquefied CO₂ and store it at low pressures and temperatures for a long time without significant losses. Given the above, the topic of the work is relevant.

The purpose of the work is to develop a circuit-cycle solution of a machine for obtaining liquefied carbon dioxide of food purity from combustible natural gas products. To achieve this goal, the following tasks were solved: a method for the synthesis of circuit-cycle solution of low-temperature medium pressure machine, energy analysis of the cascade machine cycle, selection of the main equipment of the machine and liquefied gas storage system. The object of the study is the scheme and cycle of the installation for liquefied CO₂. The subject of research is thermodynamic processes that are carried out in the elements of the machine. The scientific novelty of the study is to develop a scheme and cycle of low-temperature cascade compressor refrigeration machine with natural refrigerants in the upper cascade and different temperature levels of liquefied CO₂ in the lower.

Based on modern research of cascade refrigeration machines, two refrigerants are proposed in the upper cascade - ammonia and propane, and circuit solutions - one- and two-stage depending on the thermophysical properties of refrigerants. The machine prefers a shell-and-tube condenser-evaporator, which provides high energy efficiency of the heat transfer process and operational reliability of the entire refrigeration unit.

The possibility of combining an aggregate cascade refrigeration unit based on reciprocating compressors running on CO₂ / ammonia as a refrigerant, using CO₂ compressors without lubrication to obtain pure food CO₂

Keywords: low temperature cascade machine, CO₂ liquefaction, thermodynamic cycle, compressor without lubrication

ЗМІСТ

1. Вступ.....	1
2. Теоретична частина	
2.1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми.....	3
2.2. Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженої вуглекислоти та сухого льоду.....	8
3. Тепловий розрахунок холодильної машини	
3.1. Тепловий розрахунок каскадної холодильної машини для виробництва зрідженого CO ₂ (-20 ⁰ C)	12
3.2. Тепловий розрахунок каскадної холодильної машини для виробництва зрідженого CO ₂ (-45 ⁰ C)	22
4. Тепловий розрахунок конденсатора-випарника.....	32
5. Вибір компресорів для каскадної холодильної машини.....	37
6. Техніка безпеки для роботи з каскадними установками.....	40
7. Охорона праці.....	43
8. Висновки.....	52
9. Література.....	53

ВСТУП

Актуальність теми. Сьогодні відомо безліч різноманітних газів. Деякі з них отримують лабораторними методами з хімічних речовин, інші формуються самі в результаті реакцій в якості побічних продуктів, а деякі гази народжуються в природі. До основних газів природного походження відносять діоксид вуглецю CO₂. CO₂ широко застосовується в харчовій промисловості для газування фруктових і мінеральних вод, використовується для гасіння пожеж, застосовується в зварювальному виробництві в якості флюса і та ін.

Розвиток промисловості в сучасному світі потребує збільшеної кількості CO₂. Існуючі методи зберігання зрідженого CO₂ базуються на використанні малих резервуарів (балонів) високих тисків, до 6,0-7,0 МПа. Схемні і циклові рішення холодильних машин для отримання зрідженого CO₂ за такими параметрами мають багаторічну історію, але не задовольняють попит ринку.

На сучасному рівні розвитку холодильної техніки з'явилися технології зберігання CO₂ за низькими температурами та тисками у резервуарах великої ємності. Розвиток компресоробудування для CO₂ 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 CO₂ та зберігання його за низькими тисками та температурами тривалий час без значних втрат. Враховуючи викладене, тема роботи є актуальною.

Мета роботи – розробка схемно-циклового рішення машини отримання зрідженого діоксиду вуглецю харчової чистоти з продуктів спалюваного природного газу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити спосіб здійснення синтезу схемно-циклового рішення низькотемпературної машини середнього тиску;
- виконати енергетичний аналіз циклу машини;
- виконати вибір головного устаткування машини та системи зберігання зрідженого газу.

Об'єктом дослідження є схема та цикл установки для отримання зрідженого CO₂.

Предметом дослідження є термодинамічні процеси, які 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

Наукова новизна дослідження полягає в такому:

- запропоновано схему та цикл низькотемпературної каскадної компресорної холодильної машини з натуральними холодоагентами в верхньому каскаді та різними температурними рівнями отримання зрідженого CO₂ у нижньому.

Структура роботи. Магістерська робота складається з вступу, двох розділів, висновків, списку використаної літератури. Зміст роботи викладено на 51 сторінках, включаючи 21 рисунок, 12 таблиць, список інформаційних джерел з 18 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

1.1.1. CO₂ загальні відомості

Визначення

Ця речовина в нормальних умовах є безбарвним газом. У багатьох джерелах його можуть називати по-різному: і оксидом вуглецю (IV), і вугільним ангідридом, і двоокисом вуглецю, і діоксидом вуглецю.

Властивості

CO₂ є газом, що має кислі запах і смак, розчинний у воді. Якщо його охолоджувати, то за певних умов утворюється снігоподібна маса, звана сухим льодом, яка сублімує при температурі -78 °С. CO₂ є одним з продуктів гниття або горіння будь-якої органічної речовини. Розчиняється в воді тільки при температурі 15°C і тільки у тому випадку, якщо відношення вода- вуглекислий газ дорівнює 1: 1. Густина вуглекислого газу може бути різною, але в стандартних умовах вона дорівнює 1,976 кг / м³. Дана речовина є кислотним оксидом, його додавання в воду призводить до отримання вугільної кислоти.. Цей оксид не може підтримувати горіння, крім деяких винятків.. Також цей газ є побічним продуктом тих реакцій, при яких отримують чисті азот, кисень і аргон. У лабораторії трохи вуглекислоти виходить, коли карбонати і гідрокарбонати взаємодіють з кислотами. Ще CO₂ утворюється, коли реагують харчова сода і лимонний сік або той же гідрокарбонат натрію і оцет.

Використання

Харчова промисловість не може обійтися без використання вуглекислоти, де вона відома як консервант і розпушувач, що має код E290. Її у вигляді рідини містить будь-який вогнегасник. Також оксид чотиривалентного вуглецю, який виділяється в процесі бродіння, служить добрим підживленням акваріумних рослин. Він міститься і у всім відомій газованій воді та інших сучасних напоях. Сварка дротом відбувається у вуглекислому середовищі, але якщо температура

даного процесу дуже висока, то він супроводжується дисоціацією вуглекислоти, при якій виділяється кисень, що окислює метал. Вуглекислим газом накачують велосипедні колеса, він присутній і в балончиках пневматичної зброї. Також даний оксид в твердому стані, званий сухим льодом, потрібен як холодоагент в торгівлі, наукових дослідженнях і при ремонті деякої техніки.

CO₂ корисний не тільки в промисловості, він грає і важливу біологічну роль: Без нього не може відбуватися газообмін, регуляція судинного тону, фотосинтез і багато інших природних процесів. Але його надлишок або нестача в повітрі деякий час можуть негативно впливати на фізичний стан усіх живих організмів.

1.1.2.CO₂ як технологічний продукт установок виробництва штучного холоду

Головним способом виробництва CO₂, в тому числі як цільового продукту, є спалювання органічного палива – вугілля, природного газу, мазуту і отримання діоксиду вуглецю з димових газів з подальшим його очищенням від шкідливих домішок [1]. Слід зазначити, що наявність комплексу NO₂ в димових газах є дуже небезпечним, оскільки в поєднанні з аміном він створює азотну кислоту, яка створює стійкі солі [2]. Ці солі можуть потрапляти в товарний CO₂, що неприпустимо при його використанні у харчовій промисловості. Джерелами виробництва CO₂ є технологічні гази, такі як димовий газ, генераторний газ, який є продуктом газифікації бурого вугілля, синтез-газ – продукт газифікації вугілля й вуглеводневих газів та біогазу. Отримання CO₂ з цих газів є енергоємними процесами [3].

Якщо розглянути харчову промисловість, то значні обсяги CO₂ виникають на виробництвах, де використовуються процеси бродіння рослинної сировини. Зокрема такі процеси використовуються в спиртовій, пивній та виноробній галузях. В цих виробництвах CO₂ є побічним продуктом при виробництві цільової харчової продукції.

Робота ряду підприємств та виробництв України супроводжується значними викидами CO₂. До таких підприємств відносяться ТЕС, які виробляють електричну та теплову енергію. Викиди CO₂ тільки від ТЕС України в атмосферу Землі оцінюються майже в 100 млн т на рік.

Незалежно від джерела CO₂ існують проблеми, які необхідно враховувати під час його утилізації з газових сумішей, наприклад, димових газів. Також слід приймати до уваги характеристики устаткування, яке використовується, його довершеність і ефективність технологій вилучення CO₂. Провідними фірмами по виробництву устаткування для отримання низькотемпературного CO₂ з димових газів є «Asco carbon dioxide LTD. Union Engingeering. Tecno Industriale s.r.l. та ін.

Витяг CO₂ до і після згоряння палива базується на хімічній сорбції. Вказаний метод може бути використаним для зниження викидів CO₂ при роботі вже існуючих установок. [4].

Якщо розглядати технології по зниженню викидів CO₂ стосовно до комерційного виробництва діоксиду вуглецю, то хімічна абсорбція буде найбільш переважною і вигідною.

Отримання зрідженого CO₂ при спалюванні природного газу відносять до комерційних виробництв, при яких CO₂ є продуктом.

На рис.1 наведено одну з технологічних схем виробництва зрідженого CO₂.

Повітря і природний газ подають в пальник, спеціально розроблений для спалювання природного газу з мінімальним коефіцієнтом надлишку повітря, встановлений на генераторі CO₂. 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 промиваються і охолоджуються при прямому контакті з охолоджувальною водою до температури абсорбції 38...40°C.

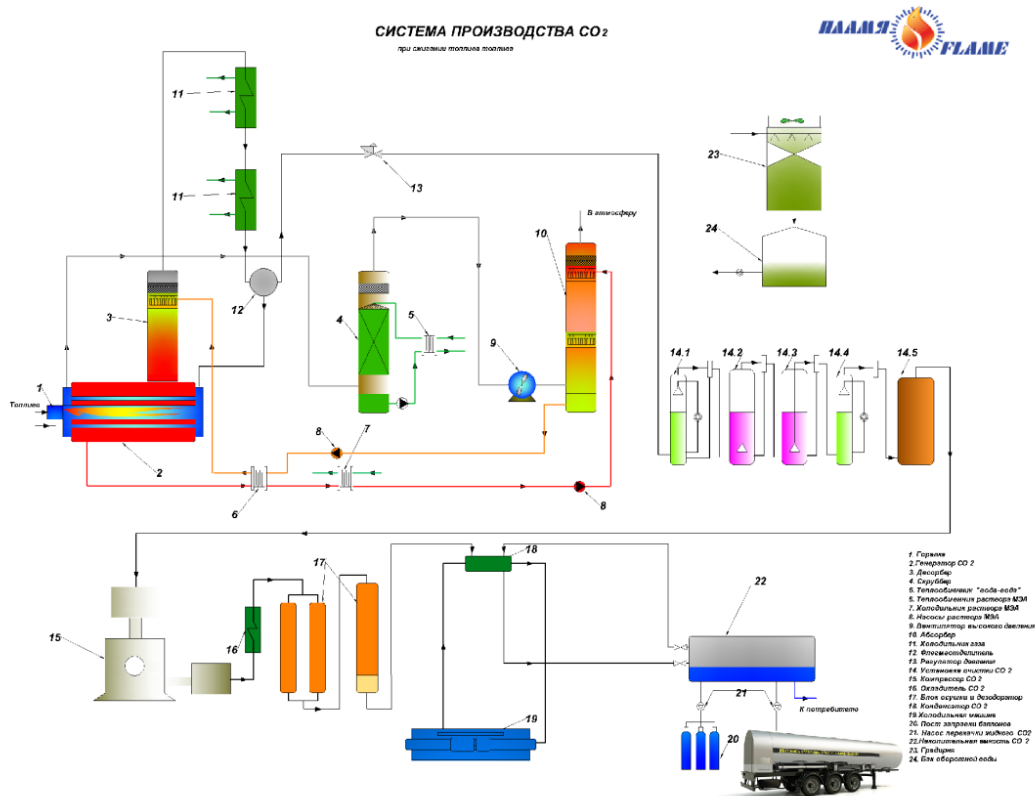


Рис.1. Технологічна схема отримання зрідженого CO₂ :

1-десорбер,2-скруббер,3-теплообмінник вода-вода, 4-теплообмінник розчину МЕА, 5-холодильник розчину МЕА , 6-насос МЕА , 7-ексхаустер, 8-абсорбер, 9-холодильник газу, 10-віддільник флегми , 11- регулятор тиску, 12-блок очищення CO₂, 13- компресор CO₂, 14-охолоджувач CO₂, 15- блок осушення CO₂, 16- конденсатор CO₂, 17- холодильна машина, 18- накопичувальна ємність CO₂, 19- насос CO₂, 20- пост заправки балонів, 21-градирня ,22- акумулятор води.

При промивці від домішок частково конденсуються пари води. У колоні абсорбера CO₂ поглинається з димових газів розчином моноетаноламіна (МЕА). Решту газів (N₂, H₂O) викидають в атмосферу. З абсорбера насичений розчин МЕА (збагачений CO₂) перекачується в колону десорбера. Перед десорбером насичений розчин підігрівається 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 в холодильнику газу. Холодильник газу складається з двох послідовно встановлених апаратів. У першому по ходу газу теплообміннику підігрівається вода до необхідної температури 60..80 ° С, а в другому відбувається повне охолодження діоксиду вуглецю до необхідної температури 35 ° С.

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_4 і адсорбер низького тиску з активованим вугіллям.

Очищений газоподібний CO_2 стискається компресором без змащення циліндрів, спроектованим і виготовленим з матеріалів, спеціально призначених для роботи з насиченим вологою газоподібним CO_2 . Стисла двоокис вуглецю після кінцевого холодильника компресора охолоджується в додатковому холодильнику холодною водою і після відділення краплинної вологи подається в блок осушки CO_2 , який складається з двох адсорберів, по черзі перемикаються для регенерації. Регенерація адсорбенту проводиться нагрітим сухим двоокисом вуглецю. Для очищення від запахів встановлено адсорбер з активованим вугіллям. Осушена і очищена двоокис вуглецю подається в конденсатор CO_2 - випарник холодоагенту, де газ конденсується за тиском 1,8 ... 2,0 МПа.

Аналізуючи наведену технологію, слід звернути увагу на те, що ілюстративний матеріал, що наведено на рис.1, не розкриває схемно-циклове рішення холодильної машини, закінчуючи виходом з установки газоподібного CO_2 , устаткування для зрідження автори не наводять. Виходячи з цього, проведемо термодинамічний аналіз циклів, які потенційно можуть забезпечити отримання зрідженого CO_2 в масштабі промислового виробництва

1.2. Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженої вуглекислоти та сухого льоду

Холодильні компресорні машини є основним типом для виробництва холоду в широкому інтервалі температур в охолоджуваних об'єктах. Для забезпечення роботи систем кондиціонування повітря і об'єктів з температурами вище -30°C застосовують одноступеневі пароконпресорні машини. При певних температурних режимах, що реалізують низькі температури кипіння (до -100°C) або високі температури конденсації (до 100°C), отримання холоду в одноступеневій машині стає неможливим через низькі значення об'ємних і енергетичних характеристик компресора.

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

Для отримання сухого льоду відомі цикли, технічні характеристики яких наведено в таблиці 1 [5]:

Таблиця 1

Номер за порядком	Тиск конденсації, МПа	Кількість ступенів дроселювання	Вихід сухого льоду за один цикл, %	Питома витрата енергії, кВт год/т
1	7,0	1	27,0	271,0
2	7,0	2	27,5	194,5
3	7,0	3	27,6	169,0
4	7,0	3	27,8	146,0
5	2,0	2	47,2	145,0
6	2,0	2	47,5	126,0

З даних таблиці бачимо, що в циклах високого тиску вихід сухого льоду однаковий, а за енергетичною ефективністю 1 та 2 цикли є малоефективні. Цикли 5 та 6 реалізують в каскадних холодильних машинах, у 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 потрійної точки, тому витрата енергії тут найменша. В циклах 3 та 4 здійснюється двоступеневе дроселювання, що забезпечує зростання виходу продукту. Каскадні цикли наведено на рис. 2-3. в діаграмах стану $p-h$

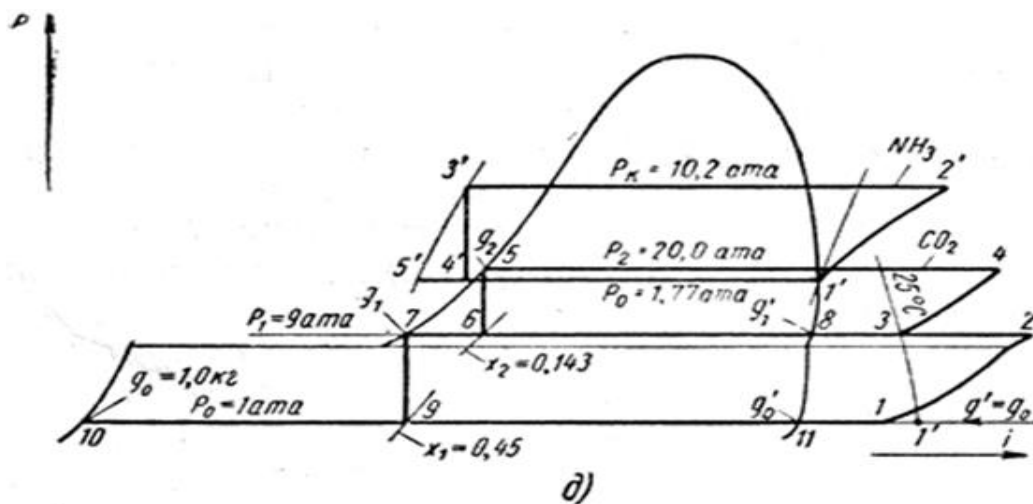


Рис.2д. Цикл отримання сухого льоду з каскадною машиною .

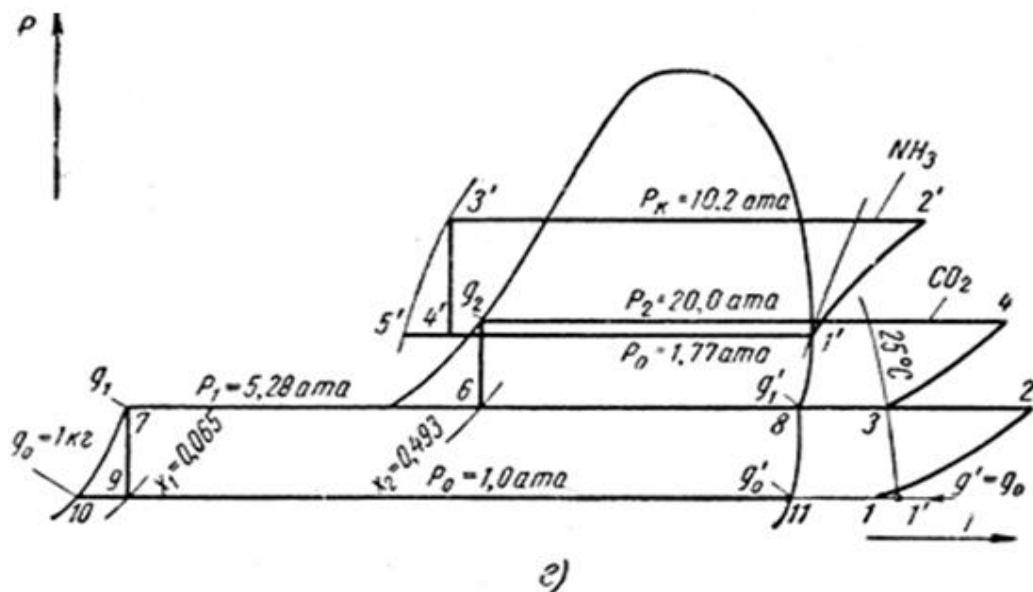


Рис.3г. Цикл отримання сухого льоду з каскадною машиною .

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 CO₂ за умови $p_{зр}=2,0$ МПа та $T_{зр}=-20^{\circ}\text{C}$. За аналогією з циклами (рис. 2.д. та 3.г.) нижній каскад працює за двоступеневим стисненням, верхній – одноступеневим. Цикл нижнього каскаду машини зрідження надано на рис.4.

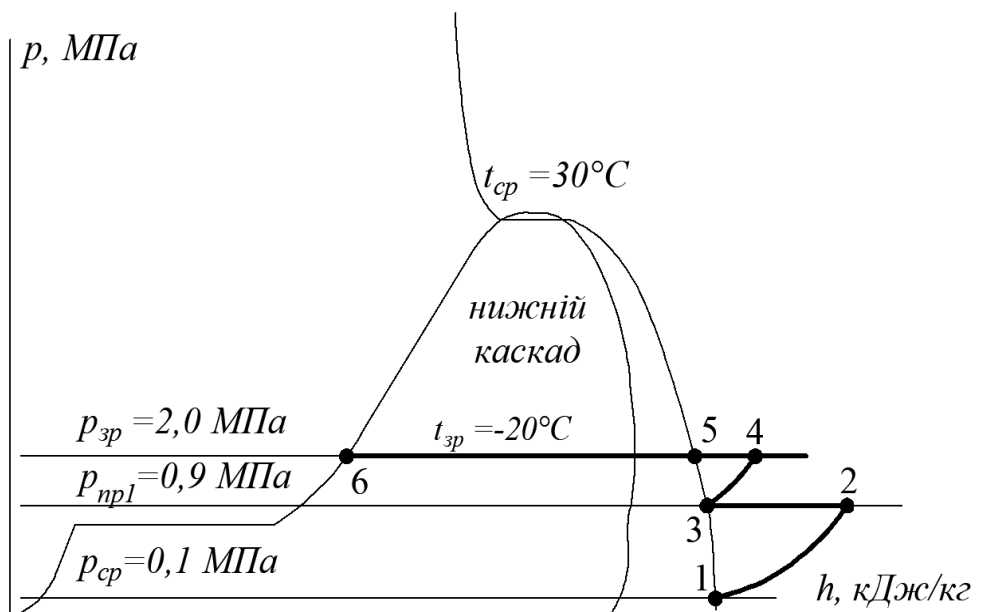


Рис.4 Цикл нижнього каскаду за умови $p_{зр}=2,0$ МПа та $T_{зр}=-20^{\circ}\text{C}$

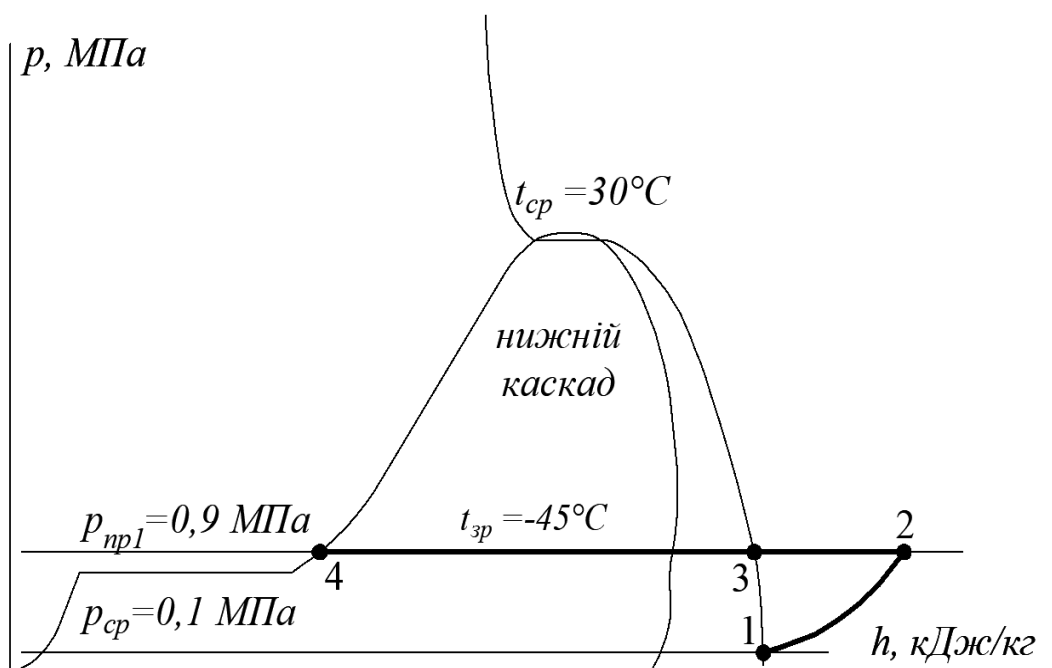


Рис.5 Цикл нижнього каскаду за умови $p_{зр}=2,0$ МПа та $T_{зр}=-20^{\circ}\text{C}$

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 стисненням у нижньому каскаді в інтервалі тисків $p_k/p_o=0,9/0,1$ (рис.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 в машинах двоступеневого стиснення для забезпечення високої енергетичної ефективності.

Спираючись на сучасні дослідження каскадних холодильних машин, пропонуємо у верхньому каскаді два холодоагенти аміак і пропан, а схемні рішення – в залежності від теплофізичних властивостей холодоагентів.

РОЗДІЛ 2.

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

2.1. Тепловий розрахунок каскадної холодильної машини для виробництва зрідженого CO₂ (-20°C)

2.1.1. Розрахунок нижнього каскаду з CO₂

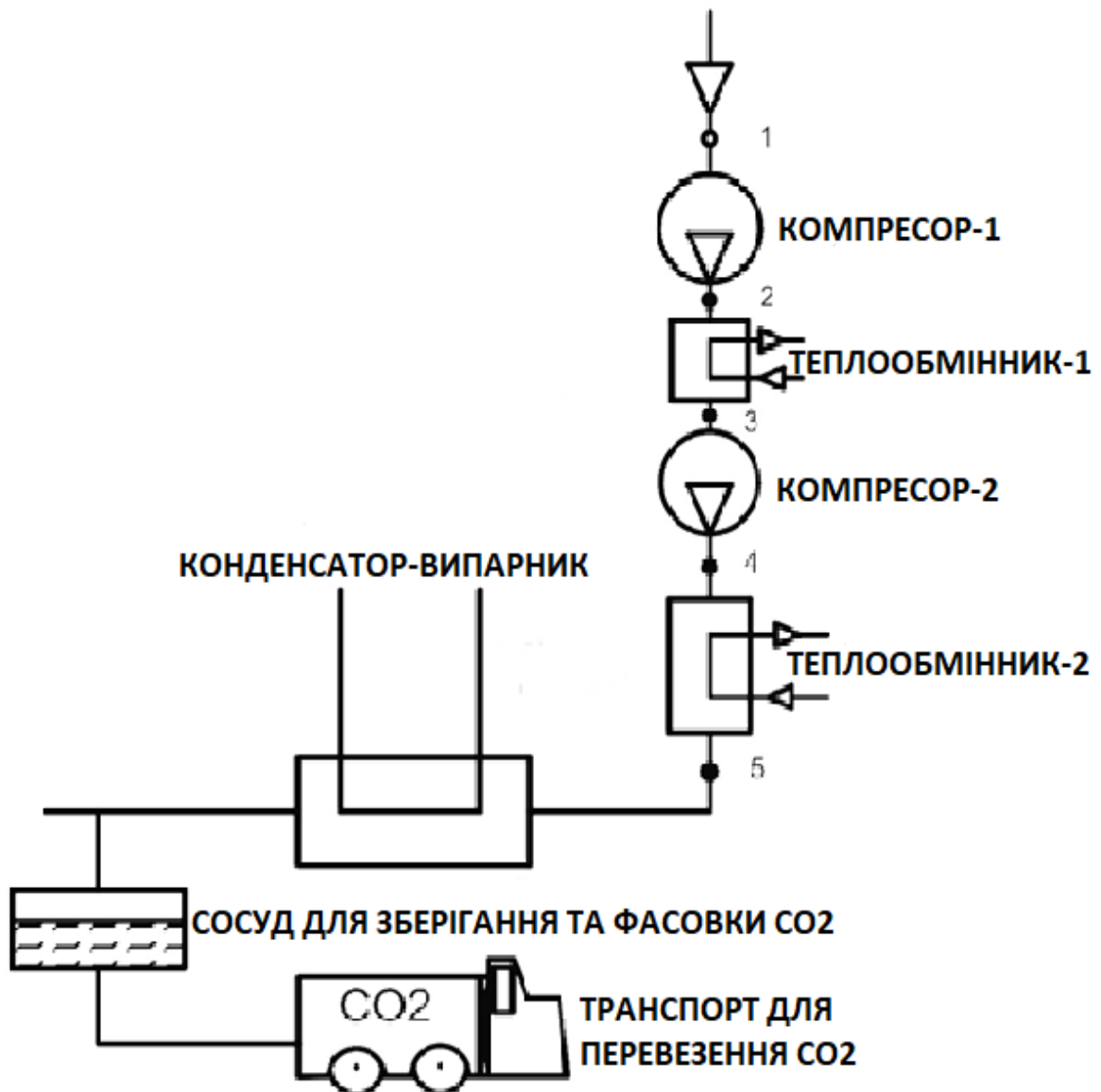


Рис.6 Принципова схема нижнього каскаду

Очищений та осушений CO₂ (точка 1) всмоктується компресором першого ступеня, стискається (точка 2) до тиску 0,9 МПа і поступає в теплообмінник 1 для охолодження зовнішнім джерелом-навколишнім середовищем. Далі газ всмоктується у компресор другого ступеня (точка 3), стискається до 2,0 МПа (точка 4). Після компресора газ знову охолоджується у теплообміннику 2 навколишнім середовищем (точка 5) і поступає у конденсатор-випарник для зрідження. Зріджений CO₂ (точка 6) накопичується у резервуарі звідки розподіляється між споживачами.

Цикл машини нижнього какаду наведено на рис.7.

Вихідні данні для розрахунку

Температура отримання зрідженого CO₂ – $t_{zp} = -20^{\circ}\text{C}$;

Температура навколишнього середовища - $t_{cp} = 30^{\circ}\text{C}$;

Масова витрата CO₂ в головному технологічному процесі $M_{CO_2} = 1 \text{ кг/сек.}$

Таблиця 2. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірювань	Точки					
		1	2	3	4	5	6
Тиск, p	МПа	0,1	0,9	0,9	2,0	2,0	2,0
Температура, t	°C	30	190	30	100	30	-20
Ентальпія, h	кДж/кг	746	922	742	788	720	378
Об'єм, v	м ³ /кг	0,5	0,12	-	0,06	-	-

Питомі характеристики циклу

Питома теплове навантаження на конденсатор – випарник, питома холодопродуктивність процесу зрідження

$$q_k^{HK} = h_5 - h_6 \quad (1)$$

$$q_k^{HK} = 720 - 378 = 342 \text{ кДж/кг}$$

Адіабатна робота компресора першого ступеня

$$w_{1ст} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$W_{1ст} = 922 - 746 = 176 \text{кДж/кг}$$

Адиабатна робота компресора другого ступеня

$$w_{2ст} = h_4 - h_3 \quad (3)$$

$$W_{2ст} = 788 - 742 = 46 \text{кДж/кг}$$

Питома теплове навантаження на теплообмінник 1

$$q_{то1} = h_2 - h_3 \quad (4)$$

$$q_{то1} = 922 - 742 = 180 \text{кДж/кг}$$

Питома теплове навантаження на теплообмінник 2

$$q_{то2} = h_4 - h_5 \quad (5)$$

$$q_{то2} = 788 - 720 = 68 \text{кДж/кг}$$

2.1.2. Розрахунок верхнього каскаду 3 r717 (-27°c)

Принципова схема верхнього каскаду (рис.7)

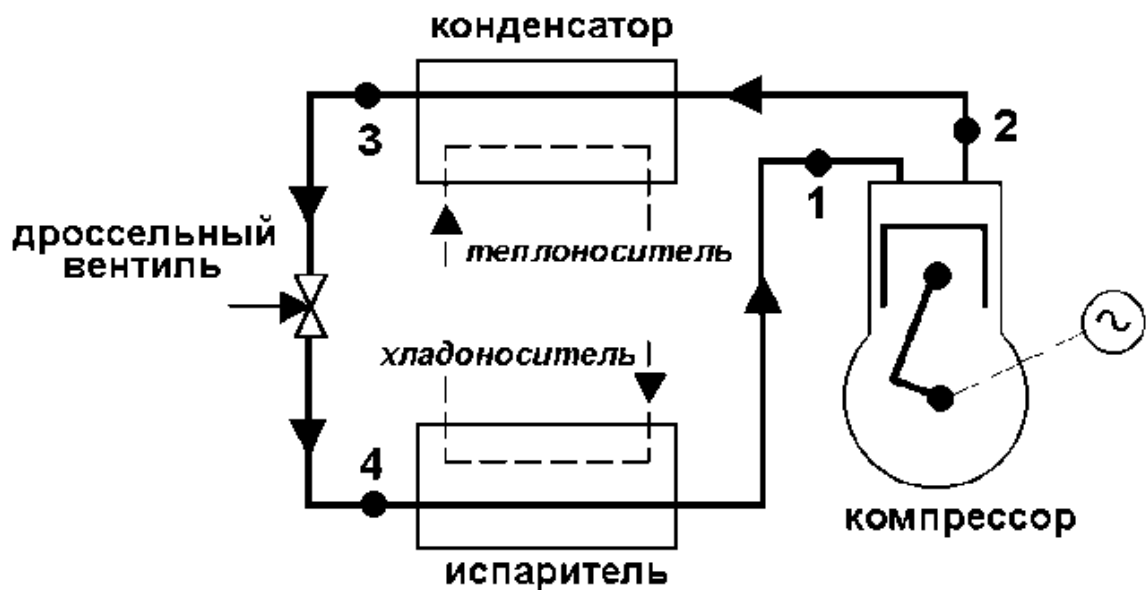


Рис.7 Принципова схема одноступеневої аміачної холодильної машини

Схема налічує чотири основні елементи і працює за класичним циклом одноступеневого стиснення.

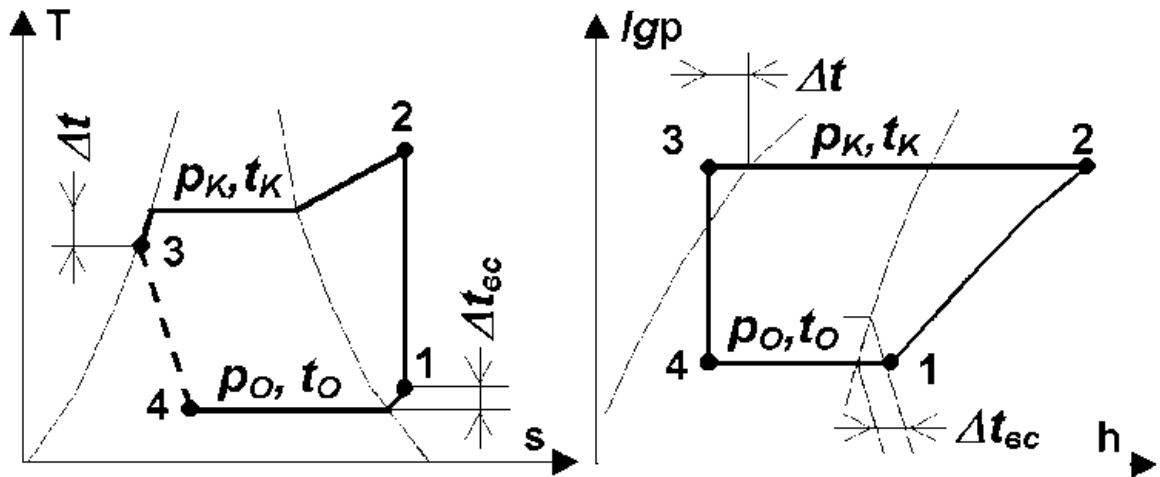


Рис.8.Цикл машини верхнього каскаду в діаграмах $T-s$, $p-h$.

Вихідні дані:

Температура кипіння R717 в конденсаторі-випарнику – $t_0^{БК} = -27^{\circ}\text{C}$;

Температура навколишнього середовища - $t_{cp} = 30^{\circ}\text{C}$;

Таблиця 3. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірювань	Точки			
		1	2	3	4
Тиск, p	МПа	1,5	15	15	1,5
Температура, t	$^{\circ}\text{C}$	-20	152	37	-27
Ентальпія, h	кДж/кг	1420	1800	350	350
Об'єм, v	м ³ /кг	0,8	-	-	-

Питомі характеристики циклу

Питоме теплове навантаження на конденсатор–випарник, питома масова холодопродуктивність верхнього каскаду

$$q_0^{БК} = h_1 - h_4 \tag{6}$$

$$q_0^{БК} = 1420 - 350 = 1070 \text{кДж/кг}$$

Тепловий баланс конденсатора–випарника

$$q_k^{HK} = a \cdot q_0^{BK} \quad (7)$$

Масова витрата робочої речовини верхнього каскаду

$$a = \frac{q_k^{HK}}{q_0^{BK}} \quad (8)$$

$$a = \frac{343}{1070} = 0.32 \text{ кг/с.}$$

Адіабатна робота компресора

$$w_{KM} = h_2 - h_1 \quad (9)$$

$$w_{KM} = 1800 - 1420 = 380 \text{кДж/кг}$$

Питома теплове навантаження на конденсатор верхнього каскаду

$$q_k^{BK} = h_2 - h_3 \quad (10)$$

$$q_k^{BK} = 1800 - 350 = 1450 \text{кДж/кг}$$

Дійсна масова холодопродуктивність верхнього каскаду

$$q_0^{BK} = 0.32 \cdot 1070 = 343 \text{кВт} \quad (11)$$

Термодинамічна ефективність циклу

Коефіцієнт подавання компресора

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda'_w \quad (12)$$

Де

$$\lambda_c = 1 - c \left[\left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]$$

$$\lambda_c = 1 - 0.015 \left[\left(\frac{15}{1.5} \right)^{\frac{1}{1.1}} - 1 \right] = 0.89$$

$$\lambda'_w = \frac{T_o}{T_k}$$

$$\lambda'_w = \frac{253,15}{310,15} = 0.87$$

$$\lambda = 0.89 \cdot 0.87 = 0.77$$

λ_c - коефіцієнт подавання, що враховує вплив «мертвого простору»,

c - відносна величина «мертвого простору», що залежить від типу і розмірів компресора, конструкції клапанів і режиму роботи, $c = 0,015 \dots 0,05$

$m - 1,1 \dots 1,25$ показник політропи зворотного розширення з «мертвого простору»;

λ'_w - коефіцієнт, що враховує об'ємні втрати, викликані дроселюванням пари в клапанах, підігріванням пари від стінок циліндра в процесі всмоктування, перетіканням з порожнини стиснення в порожнину всмоктування в результаті внутрішніх нещільності.

Теоретична об'ємна продуктивність компресора

$$V_h = \frac{V_d}{\lambda}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (13)$$

$$V_h = \frac{0.32 \cdot 0.5}{0.77} = 0.2, \text{ м}^3/\text{с}$$

Адіабатна потужність компресора

$$N_a = M_a \cdot l, \text{ кВт} \quad (14)$$

$$N_a = 0.32 \cdot 380 = 121.6 \text{ кВт}$$

Індикаторна потужність компресора

$$N_i = \frac{N_a}{\eta_i}, \text{ кВт} \quad (15)$$

$$N_i = \frac{121.6}{0.84} = 144.8, \text{ кВт}$$

$$\eta_i = \lambda'_w + b t_0,$$

$$\eta_i = 0.87 + 0.001 \cdot (-27) = 0.84$$

η_i - індикаторний ККД; $b - 0,001$ коефіцієнт; t_0 - температура кипіння

Потужність тертя

$$N_{тр} = V_h \cdot p_{iтр}, \text{ кВт} \quad (16)$$

$$N_{тр} = 0.2 \cdot 50 = 10.4 \text{ кВт}$$

де

$p_{iтр} = 50$ - середньоіндикаторний тиск тертя

$$N_e = N_{тр} + N_i, \text{ кВт} \quad (17)$$

$$N_e = 10.4 + 144.8 = 155.2 \text{ кВт}$$

Загальна робота циклу

$$\sum w = a \cdot w_{NH_3} + w_{1ст} + w_{2ст} \quad (19)$$

$$\sum w = 0,32 \cdot 380 + 176 + 46 = 343,6 \text{ кДж/кг}$$

Коефіцієнт продуктивності каскадної холодильної машини

$$\text{COP} = \frac{\sum w}{q_k} \quad (20)$$

$$\text{COP} = \frac{343,6}{343} = 1,0$$

2.1.3. Розрахунок верхнього каскаду з R290

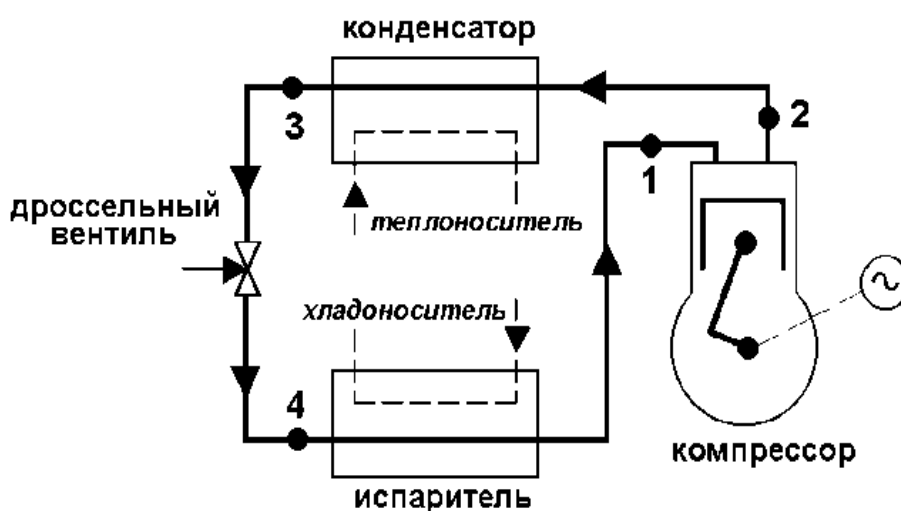


Рис.9. Принципова схема верхнього каскаду.

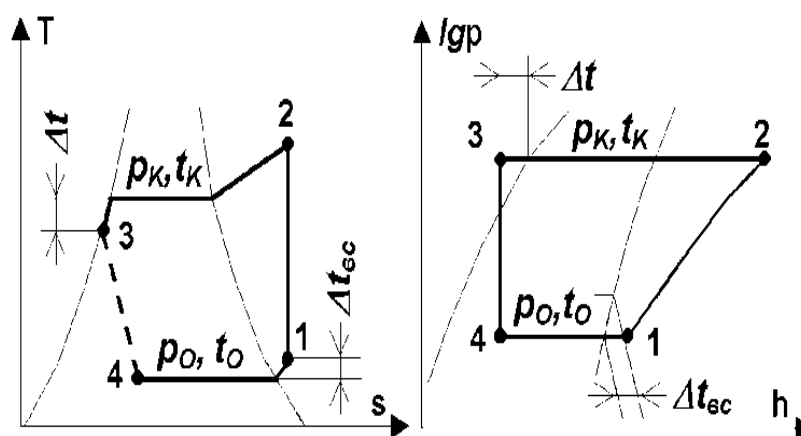


Рис.10. Цикл машини верхнього каскаду

Температура кипіння R290 в конденсаторі-випарнику – $t_0^{BK} = -27^{\circ}\text{C}$;
 Температура навколишнього середовища - $t_{cp} = 30^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 4. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірювань	Точки			
		1	2	3	4
Тиск, p	МПа	1,8	14	14	1,8
Температура, t	$^{\circ}\text{C}$	-20	58	37	-27
Ентальпія, h	кДж/кг	550	650	290	290
Об'єм, v	м ³ /кг	0,25	-	-	-

Питомі характеристики циклу

Питоме теплове навантаження на конденсатор–випарник, питоме масова холодопродуктивність верхнього каскаду

$$q_0^{BK} = h_1 - h_4 \quad (21)$$

$$q_0^{BK} = 550 - 290 = 260 \text{кДж/кг}$$

Тепловий баланс конденсатора–випарника

$$q_k^{HK} = a \cdot q_0^{BK} \quad (22)$$

Масова витрата робочої речовини верхнього каскаду

$$a = \frac{q_k^{HK}}{q_0^{BK}} \quad (23)$$

$$a = \frac{343}{260} = 1.32$$

Адіабатна робота компресора

$$w_{KM} = h_2 - h_1 \quad (24)$$

$$w_{KM} = 650 - 550 = 100 \text{кДж/кг}$$

Питоме теплове навантаження на конденсатор верхнього каскаду

$$q_k^{BK} = h_2 - h_3 \quad (25)$$

$$q_k^{BK} = 650 - 290 = 360 \text{кДж/кг}$$

Дійсна масова холодопродуктивність верхнього каскаду

$$q_0^{\text{BK}} = 1.32 \cdot 260 = 343.2 \text{кДж/кг} \quad (26)$$

Коефіцієнт подавання компресора

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda'_w \quad (27)$$

Де

$$\lambda_c = 1 - c \left[\left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]$$

$$\lambda_c = 1 - 0.015 \left[\left(\frac{15}{1.5} \right)^{\frac{1}{1.05}} - 1 \right] = 0.87$$

$$\lambda'_w = \frac{T_0}{T_k}$$

$$\lambda'_w = \frac{253,15}{310,15} = 0.87$$

$$\lambda = 0.87 \cdot 0.87 = 0.75$$

λ_c - коефіцієнт подачі, що враховує вплив «мертвого простору»,

c - відносна величина «мертвого простору», що залежить від типу і розмірів компресора, конструкції клапанів і режиму роботи, $c = 0,015 \dots 0,05$,

m - 1,0 ... 1,05 показник політропи зворотного розширення з «мертвого простору»;

λ'_w - коефіцієнт, що враховує об'ємні втрати, викликані дросселированием пара в клапанах, підігрівом пара від стінок циліндра в процесі всмоктування, перетіканням з порожнини стиснення в порожнину всмоктування в результаті внутрішніх нещільності.

Теоретична об'ємна продуктивність компресора

$$V_h = \frac{V_d}{\lambda}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (28)$$

$$V_h = \frac{1.32 \cdot 0.25}{0.75} = 0.44, \text{ м}^3/\text{с}$$

Адіабатна потужність компресора

$$N_a = M_a \cdot l, \text{ кВт} \quad (29)$$

$$N_a = 1.32 \cdot 100 = 132 \text{ кВт}$$

Індикаторна потужність компресора

$$N_i = \frac{N_a}{\eta_i}, \text{ кВт} \quad (30)$$

$$N_i = \frac{132}{0.8} = 165, \text{ кВт}$$

$$\eta_i = \lambda'_w + b t_0,$$

$$\eta_i = 0.87 + 0.0025 \cdot -27 = 0.8$$

η_i – індикаторний ККД; b – 0,0025 коефіцієнт ; t_0 – температура кипіння

Потужність тертя

$$N_{\text{тр}} = V_h \cdot p_{i\text{тр}}, \text{ кВт} \quad (31)$$

$$N_{\text{тр}} = 0.44 \cdot 50 = 22 \text{ кВт}$$

Ефективна потужність

$$N_e = N_{\text{тр}} + N_i, \text{ кВт} \quad (32)$$

$$N_e = 22 + 165 = 187 \text{ кВт}$$

Загальна робота циклу

$$\sum w = a \cdot w_{NH_3} + w_{1\text{ст}} + w_{2\text{ст}} \quad (33)$$

$$\sum w = 1,32 \cdot 100 + 176 + 46 = 354 \text{ кДж/кг}$$

Коефіцієнт продуктивності каскадної холодильної машини

$$\text{COP} = \frac{\sum w}{q_k^{\text{HK}}} \quad (34)$$

$$\text{COP} = \frac{354}{343} = 1,03$$

2.2. Тепловий розрахунок каскадної холодильної машини для виробництва зрідженого CO₂ (-45°C)

2.2.1. Розрахунок нижнього каскаду з CO₂

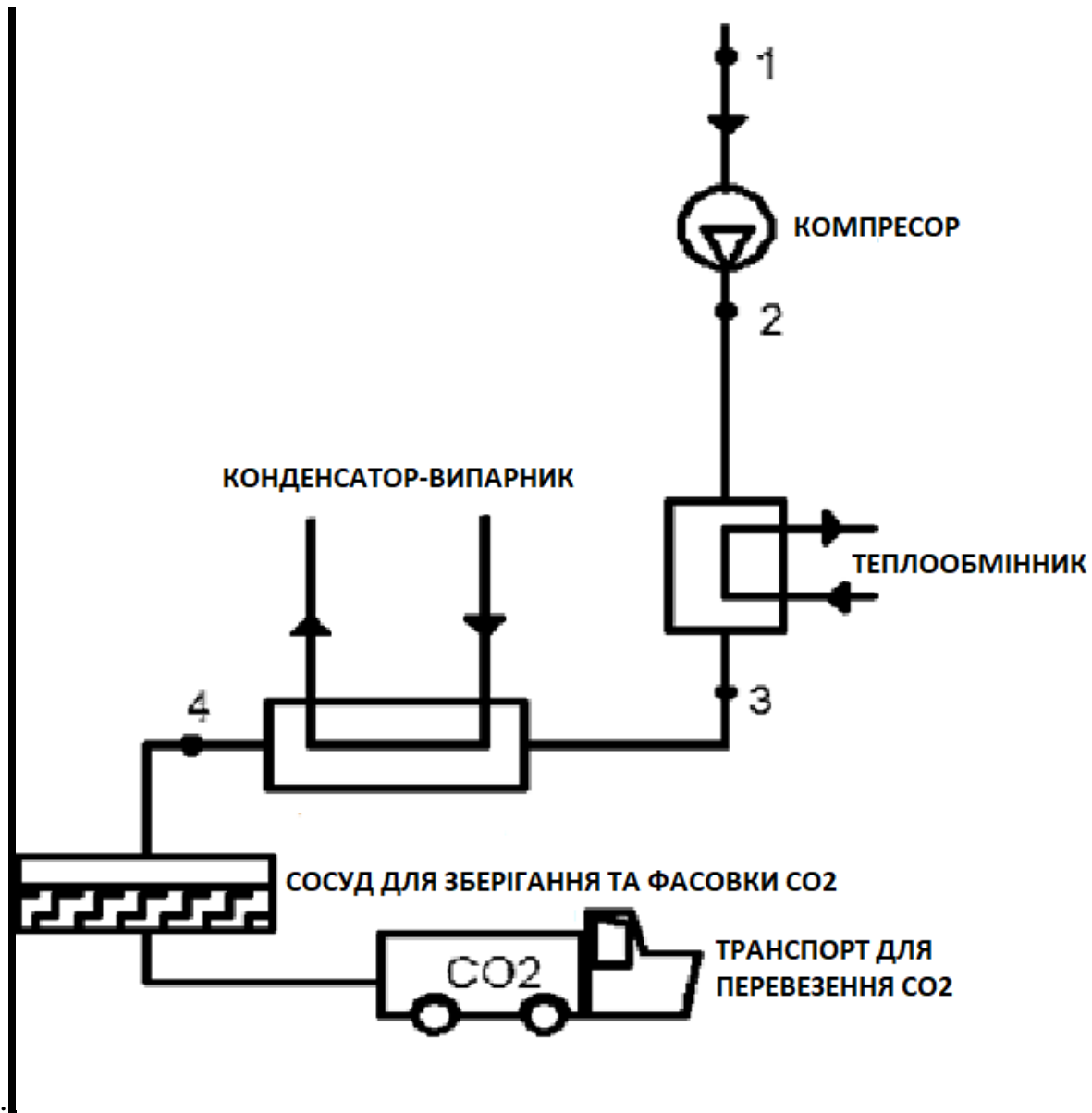


Рис.11. Принципова схема машини нижнього каскаду

Очищений та осушений CO₂ (точка 1) всмоктується компресором, стискається (точка 2) до тиску 0,9 МПа і поступає в теплообмінник 1 для охолодження зовнішнім джерелом-навколишнім середовищем.). Після охолодження у теплообміннику (точка 3) газ поступає у конденсатор-

випарник для зрідження. Зріджений CO₂ (точка 4) накопичується у резервуарі звідки розподіляється між споживачами.

Параметри зрідженого газу у резервуарі: тиск 0,9 МПа, температура - 45°C.

Лінія реконденсації газу з резервуару сберігання на схемі не вказана.

Цикл машини нижнього какаду наведено на рис.12.

Вихідні данні для розрахунку

Температура отримання зрідженого CO₂ – $t_{zp}=-45^{\circ}\text{C}$;

Температура навколишнього середовища - $t_{cp}=30^{\circ}\text{C}$;

Масова витрата CO₂ в головному технологічному процесі $M_{CO_2}=1,0\text{кг/сек}$.

Таблиця 5. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірювань	Точки			
		1	2	3	4
Тиск, p	МПа	0.1	0.9	0.9	0.9
Температура, t	°C	30	190	30	-45
Ентальпія, h	кДж/кг	746	922	742	327
Об'єм, v	м ³ /кг	0,8	-	-	-

Питомі характеристики циклу

Питома теплове навантаження на конденсатор–випарник

$$q_0^{\text{НК}} = h_3 - h_4 \quad (35)$$

$$q_0^{\text{НК}} = 742 - 327 = 415\text{кДж/кг}$$

Адиабатна робота компресора

$$w_{\text{км}} = h_2 - h_1 \quad (36)$$

$$w_{\text{км}} = 922 - 746 = 176 \text{кДж/кг}$$

2.2.2. розрахунок верхнього каскаду R717 (аміак)

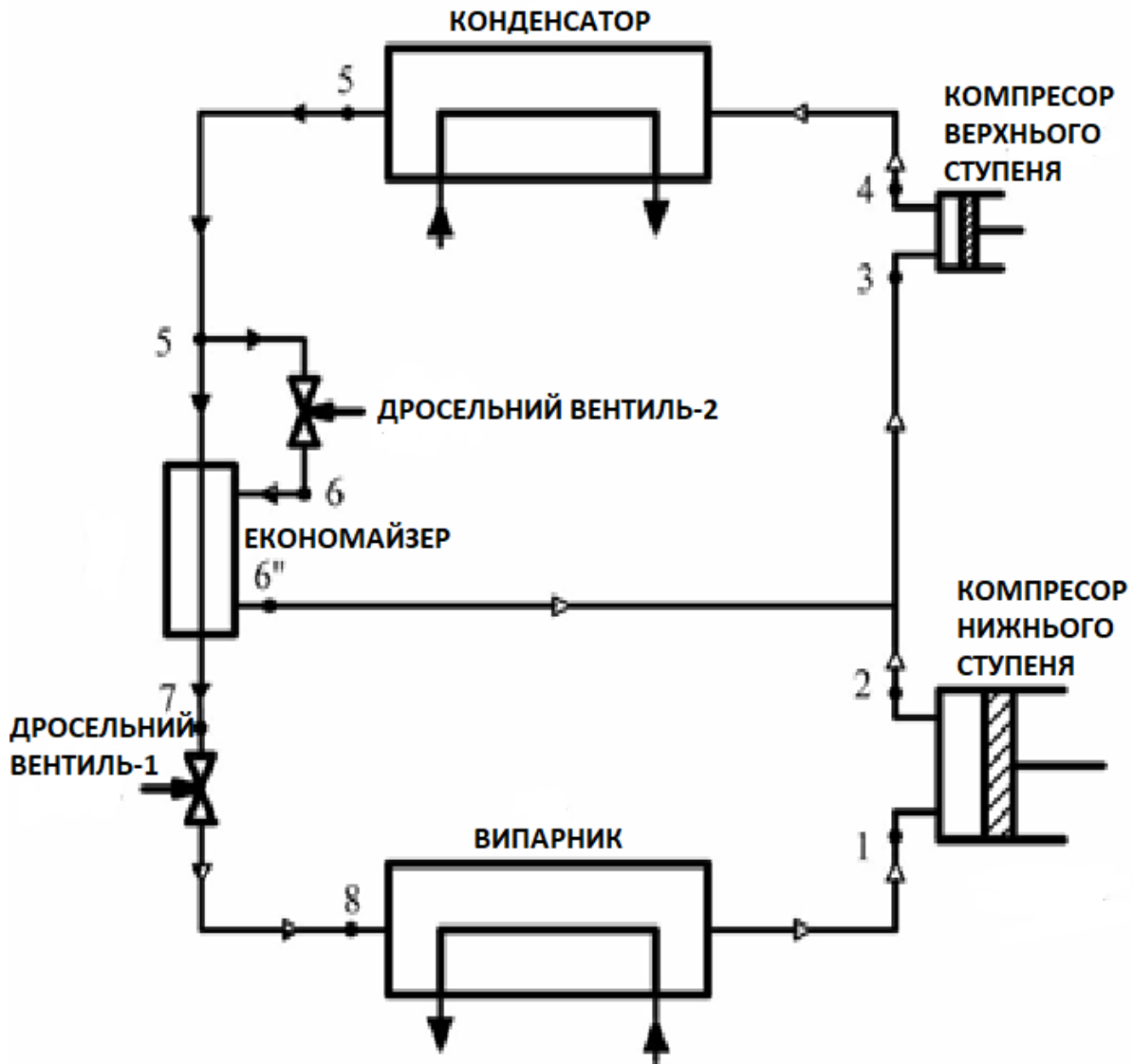


Рис.12. Принципова схема верхнього каскаду

Машина працює за циклом двоступеневого стиснення з проміжним охолодженням частиною холодопродуктивності. Цикл має назву

«з економайзером». Потік рідини після конденсатора (точка 5) розділяється на два самостійних. Обидва потоки йдуть до економайзера. Головний потік рідини високого тиску переохолоджується (точка 7), за рахунок теплообміну з другим потоком, який кипить при проміжному тиску після дроселювання (точка 6). Переохолодження залежить від величини частки холодоносія, яка відводиться для кипіння в економайзері..

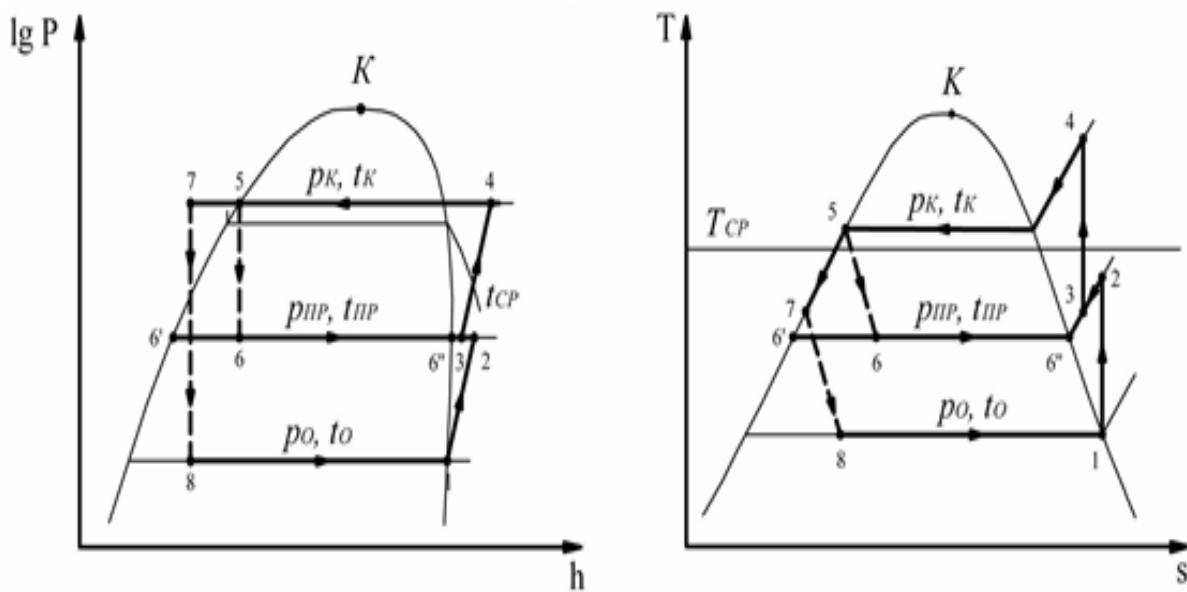


Рис.13. Принципові діаграми каскаду в $T-s$, $p-h$ (рис.13)

Вихідні данні для розрахунку

Температура кипіння R717 в конденсаторі-випарнику – $t_0^{Bk} = -50^{\circ}\text{C}$;

Температура навколишнього середовища - $t_{cp} = 30^{\circ}\text{C}$.

Проміжний тиск визначається за рішенням енергетичної задачі

$$P_{\text{пр}} = \sqrt{p_k^{Bk} p_0^{Bk}} = \sqrt{0.4 \cdot 14} = 2.4 \text{ бар}$$

Таблиця 6. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірюв	Точки								6''
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Тиск, p	МПа	0.4	2.4	2.4	14	14	2.4	14	0.4	2.4
Температура,	°С	-40	80	70	90	37	-15	-10	-50	-15
Ентальпія, h	кДж/кг	1420	1640	1610	1650	380	380	150	150	1450
Об'єм, v	м3/кг	2.7	0.7	0.5	-	-	-	-	-	-

Питомі характеристики циклу

Масова витрата робочої речовини у компресорі нижнього ступеня

$$a = \frac{q_k^{\text{HK}}}{q_0^{\text{BK}}} \quad (37)$$

$$a = \frac{415}{1270} = 0.32$$

Витрата холодоагенту через економайзер з теплового балансу

$$a(h_5 - h_7) = b(h_3 - h_5) = \text{кДж/кг} \quad (38)$$

$$b = \frac{a(h_5 - h_7)}{h_{6''} - h_6} = \frac{0.32(380 - 150)}{1450 - 380} = 0.06 \text{кг/кг}$$

Масова витрата робочої речовини через компресор верхнього ступеня

$$m^{\text{KBC}} = a + b \quad (39)$$

$$m^{\text{KBC}} = 0.32 + 0.06 = 0.38 \text{кг/сек}$$

Точка (3) визначається з енергетичного балансу процесу змішування

$$m^{\text{KHC}} \cdot h_2 + m^{\text{ЭК}} \cdot h_{6''} = m^{\text{KBC}} \cdot h_3 \quad (40)$$

$$h_3 = \frac{a \cdot h_2 + b \cdot h_{6''}}{(a + b)}$$

$$h_3 = \frac{0.32 \cdot 1640 + 0.06 \cdot 1450}{(0.32 + 0.06)} = 1610 \text{кДж/кг}$$

Питома холодопродуктивність верхнього каскаду

$$q_0^{\text{BK}} = h_1 - h_8 \quad (41)$$

$$q_0^{\text{BK}} = 1420 - 150 = 1270 \text{кДж/кг}$$

Адіабатна робота компресора першого ступеня

$$w_{1\text{CT}}^{\text{BK}} = a(h_2 - h_1) \quad (42)$$

$$w_{1\text{CT}}^{\text{BK}} = 0.32(1640 - 1420) = 70.4 \text{кДж/кг}$$

Адіабатна робота компресора другого ступеня

$$w_{2\text{CT}}^{\text{BK}} = (a + b)(h_4 - h_3) \quad (43)$$

$$w_{2\text{CT}}^{\text{BK}} = (0.32 + 0.06)(1650 - 1610) = 15 \text{кДж/кг}$$

Теплове навантаження на конденсатор

$$q_k = (a + b)(h_4 - h_5) \quad (45)$$

$$q_k = (0.32 + 0.06)(1650 - 380) = 428.6 \text{кДж/кг}$$

Загальна

робота

циклу

$$\sum w = w_{\text{K}}^{\text{HK}} + w_{\text{K1}}^{\text{BK}} + w_{\text{K2}}^{\text{BK}} \quad (46)$$

$$\sum w = 176 + 70.4 + 15 = 261.4 \text{кДж/кг}$$

Коефіцієнт продуктивності холодильної машини

$$1/\text{COP} = \frac{\sum W}{q_k^{\text{HK}}} \quad (47)$$

$$1/\text{COP} = \frac{261}{415} = 0.63$$

2.2.2. Розрахунок верхнього каскаду на R290 (ПРОПАН)

Принципова схема нижнього каскаду (рис.14)

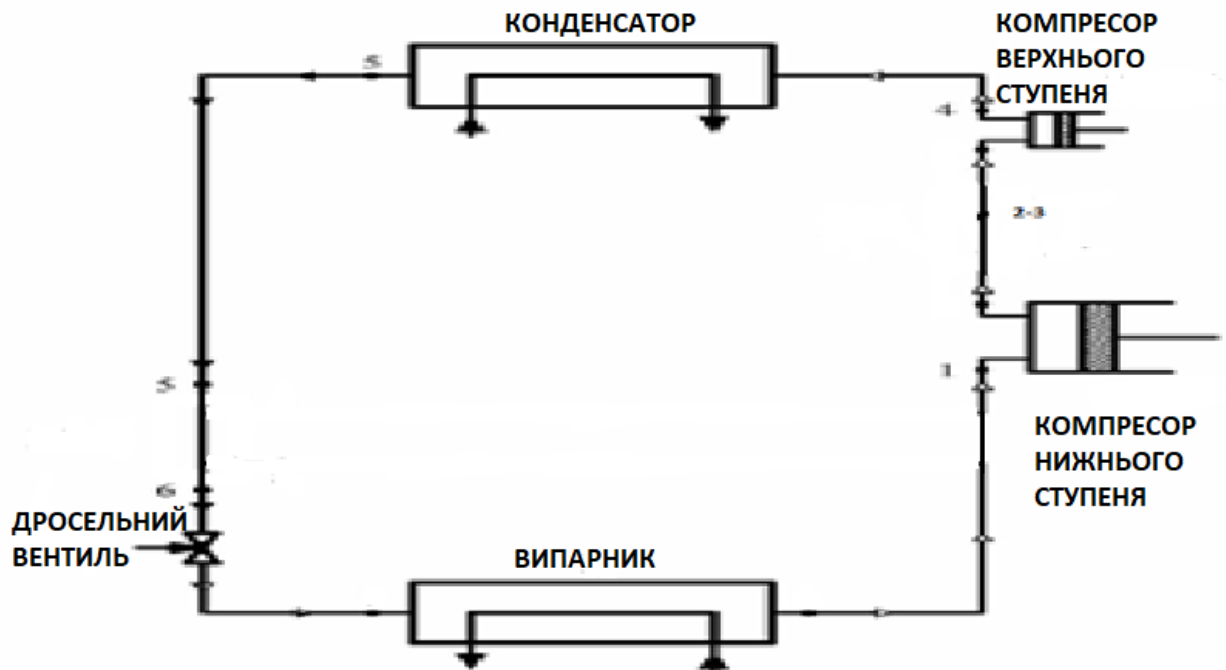


Рис.14. Принципова схема верхнього каскаду

Теплофізичні властивості пропану такі, що суха перегріта пара має низьку теплоємність, тому можна здійснити двоступеневе стиснення без проміжного охолодження між ступенями компресорів. Використання двоступеневого стиснення забезпечує підвищення енергетичної та об'ємної ефективності компресорного блоку машини.

Пара (точка 1) стискається в компресорі першого ступеня (точка 2) і поступає на всмоктування в компресор другого ступеня (точка 3). Параметри в точках 2 та 3 однакові. Далі цикл здійснюється з одноразовим дроселюванням.

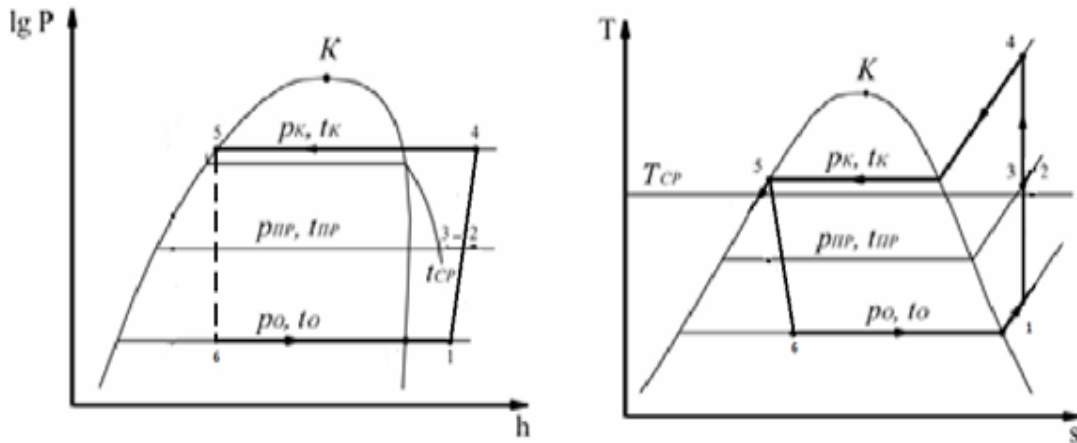


Рис.15.Цикл машини верхнього каскаду

Вихідні данні для розрахунку

Температура кипіння R290 в конденсаторі-випарнику – $t_0^{BK}=10^0C$;

Температура навколишнього середовища - $t_{cp}=30^0C$.

Проміжний тиск визначається за рішенням енергетичної задачі

$$P_{np} = \sqrt{p_k^{BK} p_0^{BK}} = \sqrt{0.7 \cdot 15} = 3 \text{ бар}$$

Таблица 7. Параметри в вузлових точках циклу

Параметри	Одиниці вимірюв.	Точки					
		1	2	3	4	5	6
Тиск, p	МПа	0.7	3	3	15	15	0.7
Температура,	0C	-40	10	10	65	37	-50
Ентальпія, h	кДж/кг	540	575	575	650	300	300
Об`єм, v	м3/кг	0.6	0.17	0.17	-	-	-

Питомі характеристики циклу

Масова витрата з теплового балансу конденсатора - випарника

$$q_K^{HK} = q_0^{HK} = a \cdot q_0^{BK} \quad (48)$$

$$a = \frac{q_0^{BK}}{q_K^{HK}}$$

$$a = \frac{240}{415} = 0.58$$

$$q_K^{HK} = q_0^{HK} = a \cdot q_0^{BK} = 0.58 \cdot 240 = 139.2 \text{ кДж/кг}$$

Холодопродуктивність верхнього каскаду

$$q_0^{\text{BK}} = h_1 - h_5 \quad (49)$$

$$q_0^{\text{BK}} = 540 - 300 = 240 \text{кДж/кг}$$

Адіабатна робота компресора першого ступеня

$$w_{1\text{CT}}^{\text{BK}} = a(h_2 - h_1) \quad (50)$$

$$w_{1\text{CT}}^{\text{BK}} = 0.58(575 - 540) = 20.3 \text{кДж/кг}$$

Адіабатна робота компресора другого ступеня

$$w_{2\text{CT}}^{\text{BK}} = a(h_4 - h_3) \quad (51)$$

$$w_{2\text{CT}}^{\text{BK}} = 0.58(650 - 575) = 53.5 \text{кДж/кг}$$

$h_3 = h_2$ (Без охолодження між ступенями)

Загальна робота циклу

$$\Sigma w = w_{\text{K}}^{\text{HK}} + w_{\text{K}}^{\text{BK}} + w_{\text{K}}^{\text{BK}} \quad (52)$$

$$\Sigma w = 176 + 20.3 + 53.5 = 250 \text{кДж/кг}$$

Коефіцієнт продуктивності холодильної машини

$$1/\text{COP} = \frac{\Sigma w}{q_k^{\text{HK}}} \quad (53)$$

$$1/\text{COP} = \frac{250}{415} = 0.6$$

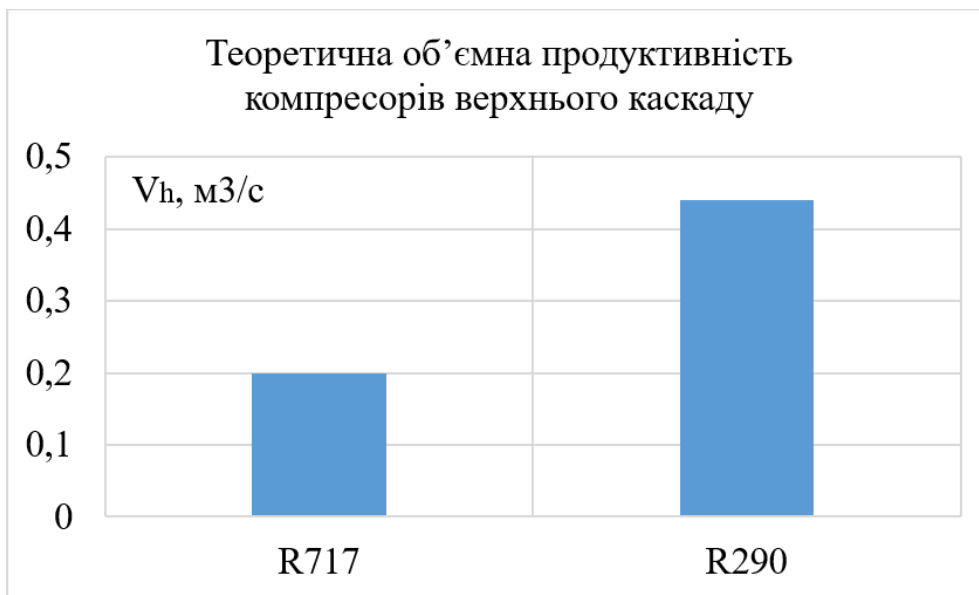


Рис.16. Порівняльний аналіз характеристик компресорів верхнього каскаду в схемі $t_{\text{зр}} = -20^{\circ}\text{C}$ та $p_{\text{зр}} = 2,0 \text{МПа}$

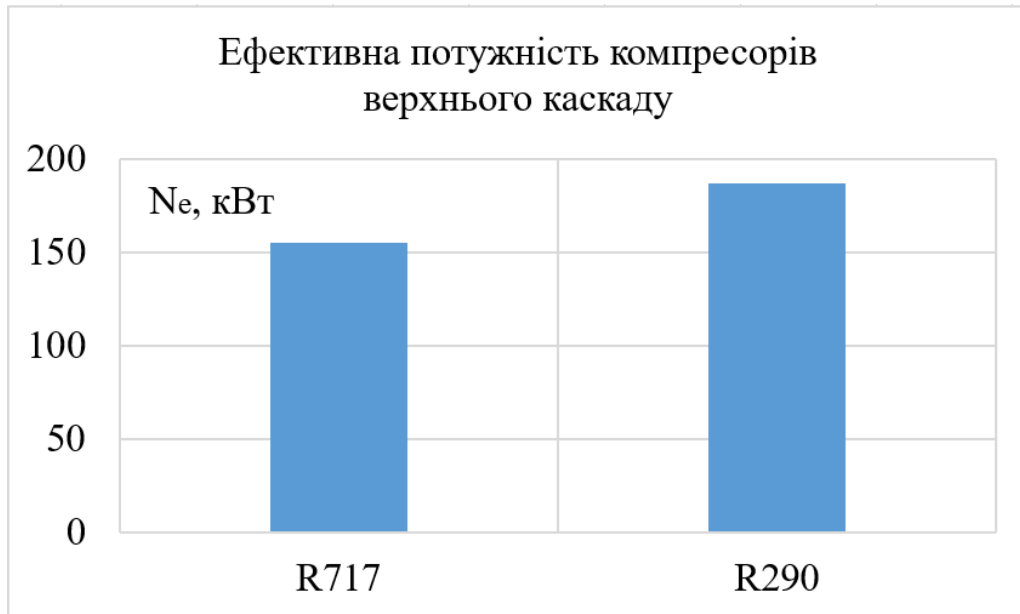


Рис.17. Енергетичний аналіз одноступеневих машин верхнього каскаду $t_{зр}=-20^{\circ}\text{C}$ та $p_{зр}=2,0\text{Мпа}$

Результати аналізу свідчать, що масогабаритні характеристики компресора з R717 кращі за масогабаритні характеристики R290. Різниця становить 55%. У той же час енергетичні характеристики відрізняються на 25%. Вибір холодоагента верхнього каскаду буде цілком залежить від споживача.

3. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КОНДЕНСАТОРА-ВИПАРНИКА

У низькотемпературних каскадних холодильних машинах перевагу віддано кожухотрубним теплообмінним апаратам, які забезпечують високу енергетичну ефективність процесу теплопередавання і експлуатаційну надійність всієї холодильної установки.[6]

Вихідні параметри:

1. Температура конденсації CO₂ нижнього каскаду $t_k^{HK} = -20^{\circ}C$
2. Температура кипіння R717 верхнього каскаду $t_k^{BK} = -27^{\circ}C$
3. Теплове навантаження на конденсатор-випарник $Q_{KI} = 343 \text{ кВт}$

Примітка: оскільки невідома продуктивність основного технологічного процесу виробництва зрідженого CO₂, для розробки методики розрахунку зазначеного теплового апарату теплове навантаження прийнято довільно в межах попередніх теплових розрахунків.

У даній роботі використана подібна конструкція за таких умов, приймаємо, що холодильний агент нижнього каскаду (CO₂) конденсується в трубі, а холодильний агент верхнього каскаду (R717) кипить в міжтрубному просторі.[6]

Геометрія теплообмінної поверхні:

$d_{\text{нар}} = 12 \text{ мм}$ - зовнішній діаметр труб;

$d_{\text{вн}} = 10 \text{ мм}$ - внутрішній діаметр труб;

$l = 3 \text{ м}$ - довжина однієї труби в апараті.

Розрахунок густини теплового потоку з боку CO₂, що конденсується всередині труб.

Закономірності, що визначають теплообмін при конденсації всередині горизонтальних труб, істотно відрізняються від встановлених для конденсації на зовнішній поверхні труб. У деяких випадках при збільшенні теплового потоку і довгих трубах коефіцієнт тепловіддавання зростає. В результаті дослідження по конденсації водяної пари усередині горизонтальних труб виявлена залежність

$\alpha \approx q^n \cdot l^m$, де $n \cong 0.5$ та $m \cong 0.3$. На підставі цих даних можна рекомендувати розрахункове рівняння [7].

$$\alpha = M \cdot q^{0.5} \cdot l^{0.35} \cdot d^{-0.25} \quad (54)$$

Коефіцієнт M залежить від фізичних властивостей речовини, що конденсується і температури конденсації і вибирається згідно до [7]. Після математичних перетворень отримуємо.

$$\begin{aligned} q^{1-0.5} &= M \cdot l^{0.35} \cdot d^{-0.25} \theta_H \\ q^{0.5} &= M \cdot l^{0.35} \cdot d^{-0.25} \theta_H \\ q &=^{0.5} \sqrt{M \cdot l^{0.35} \cdot d^{-0.25} \cdot \theta_H} \\ q &=^{0.5} \sqrt{M \cdot l^{0.35} \cdot d^{-0.25}} \cdot^{0.5} \sqrt{\theta_H} \\ q_{CO_2} &=^{0.5} \sqrt{9.213^{0.35} \cdot (10 \cdot 10^{-3})^{-0.25}} \cdot \theta_H^2 = 2025 \cdot \theta_H^2 \quad (55) \end{aligned}$$

У рівнянні (55) температурний напір θ є різниця температур на тепловіддавання між потоком CO₂ і стінкою труби, в якій він конденсується.

$$\theta = t_k - t_{ст} \quad (56)$$

Розрахунок густини теплового потоку з боку R717, який кипить у міжтрубному просторі.

Коефіцієнт тепловіддавання при кипінні аміаку в необмеженому об'ємі на поверхні горизонтальної труби визначається відповідно до рекомендацій роботи [8]

$$\alpha = 45^{\frac{5}{3}} \cdot \theta_B^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d_H}{d_{BH}} \quad (57)$$

Після математичних перетворень отримаємо рівняння для густини теплового потоку з сторони R717.

$$\begin{aligned} q_{R717} &= 45^{\frac{5}{3}} \cdot \theta_B^{\frac{5}{3}} \cdot \frac{d_H}{d_{BH}} \quad (58) \\ q_{R717} &= 45^{\frac{5}{3}} \cdot \theta_B^{\frac{5}{3}} \cdot \frac{12 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 666 \cdot \theta_B^{1.66} \end{aligned}$$

У рівнянні (58) величина θ є різниця температур на тепловіддавання між потоком R717 і стінкою труби, на якій він кипить.

$$\theta = t_{ст} - t_0 \quad \text{В} \quad (59)$$

Густина теплового потоку в апараті визначаємо графоаналітичним методом. Температурний напір між потоками відповідно до завдання $\Delta t=7$ градусів.

Графічне зображення рівнянь (55), (58) будемо в координатах $q_{Fвн} - \theta$, відкладаючи θ_n та θ_g з двох початкових точок, розташованих на відстані θ_m .

Дані для побудови представлені в таблицях 8-9.

Таблиця 8. $q_{CO_2} = 2025 \cdot \theta_n^2$

θ_n	1	2	3	4	5	6	7
q_{0CO_2}	2025	8100	18450	25000	51625	72900	99200

Таблиця 9. $q_{NH_3} = 666 \cdot \theta_B^{1.66}$

θ_n	1	2	3	4	5	6	7
q_{0R717}	666	2100	4125	6660	9600	13037	16839

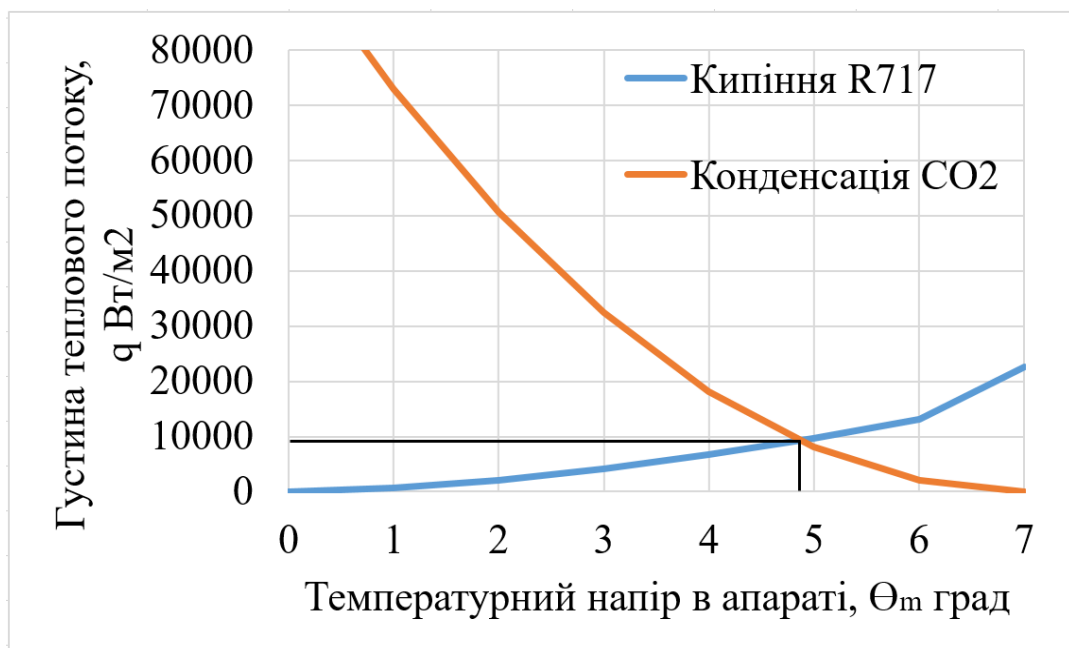


Рис.18 Рішення задачі графоаналітичним методом.

Густина теплового потоку, віднесена до внутрішньої поверхні конденсатора-випарника:

$$q_{F_{BH}} = 10000 \text{ Вт/м}^2$$

Температура стінки - 23,8 °С

Конструктивний розрахунок апарату:

Визначаємо теплообмінну внутрішню поверхню конденсатора-випарника, використовуючи рекомендації роботи [8]

$$F_{BH} = \frac{Q_{KH}}{q_{F_{BH}}} = \frac{343 \cdot 1000}{10000} = 34.3 \text{ м}^2. \quad (60)$$

Визначаємо загальну довжину труб в апараті

$$L = \frac{F_{BH}}{\pi \cdot d_{BH}} = \frac{34.3}{3.14 \cdot 0.01} = 1092 \text{ м}. \quad (61)$$

Загальна кількість труб в апараті

$$n = \frac{L}{l} = \frac{1092}{3} = 364 \text{ шт.} \quad (62)$$

Крок труб по горизонталі s визначають зі співвідношення $s/d_n = 1.25$. Тоді $s = 1.25 \cdot 0.012 = 0.015 \text{ м}$.

Приймаємо відношення $k = l/D = 6$.

Визначаємо параметр m - кількість труб по діагоналі зовнішнього шестигранника

$$m = 0.75 \sqrt[3]{F_{BH} / (d_{BH} k s)} \quad (63)$$

$$m = 0.75 \sqrt[3]{34.3 / (0.01 \cdot 6 \cdot 0.015)} = 25$$

Отримане число округляємо до найближчого непарного числа і визначаємо основні конструктивні параметри апарату.

Діаметр трубної решітки

$$D = ms \quad (64)$$

$$D = 25 \cdot 0.015 = 0.375 \text{ м}$$

Кількість труб в апараті при повному заповненні трубної решітки

$$n = L / (msk) \quad (65)$$

$$n = 1092 / (25 \cdot 0.015 \cdot 6) = 487$$

4. ВИБІР КОМПРЕСОРІВ ДЛЯ КАСКАДНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

Компактні агреговані каскадні холодильні установки на основі поршневих компресорів, що працюють на CO₂ / аміаку в якості холодоагенту, з діапазоном потужності 100-800 кВт.

Високонадійні холодильні установки SABROE CAFR представляють собою каскадну систему, яка поєднуватиме переваги низькотемпературного контуру, що працює на CO₂, і високотемпературного контуру, що використовує аміак як холодоагент.

Пакетовані системи (рис.20) побудовані на основі поршневих компресорів SABROE, в яких в якості холодоагенту використовується аміак, що забезпечує експлуатаційну надійність холодильної установки.



Рис.20. Каскадна холодильна машина CO₂- аміак [10]

В результаті, всі стандартні блоки CAFR можуть при необхідності встановлюватися в стандартний 20-футовий транспортний контейнер. Дане

рішення усуває потребу в спеціальному машинному приміщенні, а установку можна легко перемістити в інше місце в разі потреби.

Стандартний модельний ряд каскадних машин представлено 6 типорозмірами, холодопродуктивністю від 87 до 793 кВт з температурою кипіння CO₂ від -33 до -53 °С

Компресори нижнього каскаду можуть бути замінені іншими моделями, які здатні забезпечити отримання зрідженого CO₂.



Рис.21. Двоступеневий мембранний компресор Ковинт КСВД-М [11]



Рис.22. Сухий гвинтовий компресор [12]

Відсутність змащення в системі холодильної машини, в якій здійснюється зрідження газу, відкриває нові можливості отримання температур нижче -40°C. Застосування компресорів без змащення дозволяє отримати чистий продукт, особливо харчовий CO₂. Такі позитивні властивості CO₂, як

порівняно високий коефіцієнт тепловіддавання, не знижуватиметься, завдяки чому можна буде застосовувати для холодильних систем нові високоефективні і компактні теплообмінники. Відсутність оливи вже не обмежує максимальну температуру нагнітання в компресорі. Конструкція компресора може бути адаптована до умов застосування, будь-то ультранизькі температури або підвищені температури зовнішнього повітря.

Світовий ринок холодильного обладнання пропонує для систем без змащення такі конструкції компресорів:

- гвинтові сухі компресори(рис.22);
- мембранні компресори (рис.21)

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ДЛЯ РОБОТИ З КАСКАДНИМИ УСТАНОВКАМИ [13]

Як холодоагент в холодильних установках використовується аміак, що має низку небезпечних і шкідливих властивостей.

Наявність аміаку відчувається за запахом із вмістом його в повітрі 0,35 мг/м³. Гранично допустима концентрація аміаку у повітрі – 20 мг/м³. У зв'язку з токсичністю і вибухонебезпечністю аміаку холодильні установки з цим холодоагентом відносять до устаткування підвищеної небезпеки.

Для запобігання аваріям в аміачних холодильних установках використовуються арматура, запобіжні клапани, контрольно-вимірювальні прилади і засоби автоматичного захисту.

У холодильних установках запірні вентиля на трубопроводах і апаратах неагрегатних машин, окрім основних запірних вентилів компресорів, повинні бути запломбовані у відкритому положенні. У місцях, де арматура і трубопроводи можуть бути пошкоджені транспортними засобами або вантажами, встановлюються металеві захисні огорожі. У кожухотрубних апаратах і ресиверах є оглядові віконця для візуального контролю рівня рідини.

У холодильних установках для спостереження за робочим тиском нагнітання, всмоктування, в системі оливи і в картері використовуються манометри і мановакууметри.

На нагнітальних магістралях встановлюють зворотні клапани для запобігання зворотному рухові холодоагенту в разі зупинки компресорів.

Компресори холодильних установок мають пружинний запобіжний клапан, що сполучає порожнини нагнітання і всмоктування з перевищенням допустимої різниці тиску. Посудини, апарати і технологічне устаткування з безпосереднім охолодженням, що містить рідкий холодильний агент, а також деякі компресори забезпечені пружинними клапанами, що скидають його пару в атмосферу. У аміачних холодильних установках запобіжні клапани повинні бути

відрегульовані на початок відкриття: 1,2 МПа – на стороні всмоктування і 1,8 МПа – на стороні нагнітання.

Замість пружинного запобіжного клапана компресор може мати чавунну запобіжну пластинку, що розривається за різниці тиску не більше 1,6 МПа. Випуск пари аміаку в атмосферу через запобіжні клапани повинен проводитися по трубі, що виводиться на 1 м вище «конька» даху найвищої будівлі в радіусі 50 м, але не менше 6 м від рівня території і не менше 3 м від майданчиків обслуговування в радіусі 15 м. Діаметр відповідної труби повинен бути не меншим за діаметр запобіжного клапана.

Запобіжні клапани компресорів перевіряють не рідше одного разу на рік, запобіжні клапани на апаратах (посудинах) – не рідше одного разу на шість місяців. Циліндри компресорів аміачних холодильних установок мають кришку безпеки. На нагнітальному і всмоктувальному трубопроводах кожного компресора встановлені гільзи для термометрів, захист яких від механічних пошкоджень забезпечується за допомогою спеціальних кожухів. Холодильні установки оснащені приладами автоматичного захисту, що зупиняють компресори у разі небезпечних режимів роботи.

Захист від підвищеного тиску нагнітання під час пуску компресора з закритим запірним вентилям, за неприпустимо високого тиску конденсації забезпечується за допомогою реле високого тиску (РТ). Автоматичний контроль рівня хладагента в апаратах здійснюється за допомогою реле рівня (РР). Для захисту від припинення подавання води в охолоджувальну сорочку компресора, а в установках з кожухотрубними випарниками – від припинення руху холодоносія, використовується реле потоку (РП). Захист від підвищеної температури нагнітання досягається відключенням компресора за допомогою реле температури (РТ). Для контролю тиску в системі оливи застосовують реле контролю РКМ (реле різниці тиску). За неприпустимо низького тиску оливи реле відключає компресор.

Якщо вміст аміаку в повітрі досягає 1500 мг/м^3 (0,21 %) – сигналізатори аварійної концентрації вимикають електроживлення холодильної установки і одночасно включають витяжну й аварійну вентиляцію, світлозвукову сигналізацію і сирену,.

За цілодобового обслуговування холодильної установки індикатори витоку і сигналізатори аварійної концентрації пари аміаку можна не встановлювати.

Для виявлення аміаку в повітрі можуть бути використані газоаналізатори інфрачервоного поглинання типу ГПП, в циркуляційній воді – реактив Несслера.

Обслуговуючий персонал аміачних холодильних установок забезпечують засобами індивідуального захисту (фільтруючі протигази типу КД, ізолюючі дихальні апарати стислого повітря типу АСВ або ізолюючі протигази типу ІІІ, гумові рукавички і чоботи, захисні окуляри) та медикаментами для надання першої долікарської допомоги. На кожному підприємстві повинно бути не менше трьох костюмів Л-1 або захисних костюмів КІХ-4 для проведення аварійних робіт в загазованих аміаком приміщеннях.

Протигази марки КД і апарати типу АСВ зберігають в шафах зовні машинного (апаратного) відділення, поряд з вхідними дверима, протигази КД – в машинному (апаратному) відділенні, біля входу, а також в коридорі (вестибюлі), прилеглому до холодильних камер з безпосереднім охолодженням, і у виробничих цехах, де встановлено технологічне устаткування з безпосереднім охолодженням.

У приміщенні, де знаходиться хладонова холодильна установка, необхідно мати фільтруючі протигази, не менше двох пар гумових рукавичок, захисні окуляри і рукавиці, а також аптечку. На випадок аварійного витоку хладона з системи в машинне відділення зберігають у шафі не менше двох ізолюючих дихальних апаратів типу АСВ або ізолюючих протигазів типу ІІІ.

7. ОХОРОНА ПРАЦІ

Техніка безпеки при роботі з продуктами поділу повітря

При отриманні, транспортуванні та використанні кисню в результаті контакту кисню з конструкційними матеріалами можуть утворюватися горючі та вибухові системи. Ступінь небезпеки систем залежить не лише від умов роботи та конструктивних особливостей кисневого обладнання, але головним чином від параметрів кисню.

Поряд із збільшенням обсягу споживаного кисню в сучасній техніці значно підвищуються параметри, за яких він використовується. Внаслідок цього підвищується інтенсивність згоряння речовин, а також можливість утворення горючих систем та ймовірність вибухів та пожеж від випадкових джерел. У загальному випадку це відбувається при підвищенні тиску, температури, концентрації та швидкості потоку кисню. Недооцінка цієї небезпеки експлуатації кисневого обладнання неодноразово призводила до серйозних аварій.

Забезпечення безпечної експлуатації кисневого обладнання полягає у вирішенні питання умов безпечного використання матеріалів і речовин у контакті з киснем, тобто. у визначенні сумісності матеріалів та речовин з киснем. Ці умови можуть бути встановлені в результаті вивчення процесів займання і горіння матеріалів та дослідження впливу на параметри цих факторів, що характеризують специфіку застосування даного матеріалу для виготовлення обладнання повітророзподільних установок.

Важко дати навіть невеликий перелік конструкційних матеріалів та речовин, застосування яких у контакті з киснем було б абсолютно безпечним. У ряді випадків можуть бути обмежені параметри кисню або введені певні вимоги до використання матеріалів, коли система загалом стає вибухонебезпечною, тобто. у ній неможливе поширення полум'я чи детонації. Наприклад, для газових вибухових сумішей такими параметрами концентраційні межі горіння; для металів - граничні тиску кисню, при яких

горіння не поширюється від місця запалення на всю замащену поверхню або всю масу металу незалежно від розмірів.

З ряду причин (міцність, корозійна стійкість, вартість та ін.) при створенні багатьох видів кисневого обладнання важко, а іноді й неможливо забезпечити умови або використовувати матеріали, коли всі елементи конструкції абсолютно вибухові.

При оцінці небезпеки застосування матеріалів, що працюють у контакті з киснем, необхідно вирішити два питання: визначити умову, за яких використання матеріалів не становить небезпеки, визначити умови, за яких існує принципова можливість загоряння, але його ймовірність та наслідки можуть бути вивчені та обмежені відповідними вимогами при застосуванні цього матеріалу.

Виходячи з цього, вибирають методи дослідження поведінки матеріалів у кисні та визначають необхідні заходи з техніки безпеки.

Азот є інертним газом, він не токсичний і не пожежо- та вибухонебезпечний. Небезпека при роботі з цим газом виникає при забрудненні ним повітря в зоні знаходження обслуговуючого або ремонтного персоналу внаслідок зниження вмісту кисню, що призводить до недостатності кисню - задухою.

У зонах обслуговування та ремонту, де можливі витікання азоту, повинен виконуватися контроль вмісту кисню у повітрі. Нормальний вміст кисню в повітрі робочої зони за об'ємною часткою має бути не нижчим за 19%.

При вмісті кисню в повітрі за об'ємною часткою менше 19% повинні бути вжиті термінові заходи щодо усунення витоків інертних газів, вентиляції та провітрювання приміщень та, у разі потреби, припинення роботи, та евакуація персоналу. При вмісті кисню у повітрі за об'ємною часткою менше 16%, у виняткових випадках допускається короткочасне перебування людей у шлангових чи кисневих протигазах. Використання фільтруючих протигазів всіх марок для роботи в середовищі зі зниженим вмістом кисню забороняється.

Проби повітря на вміст кисню повинні відбиратися при забрудненні

повітря азотом у верхній частині приміщення.

Категорично забороняється залишати на ніч у закритих приміщеннях судини з рідким азотом, якщо газоскид не виведено за межі приміщення.

При перебуванні в атмосфері зі зниженим вмістом кисню людина втрачає свідомість без будь-яких попередніх симптомів (запаморочення, нудота тощо).

Якщо хтось із працюючих знепритомніє, постраждалого слід негайно винести на свіже повітря і зробити штучне дихання. Крім того, необхідно одразу ж викликати лікаря.

Роботи в приміщенні можна відновити лише після того, як воно буде провітрюване і вміст кисню в повітрі буде не менше 19%.

Небезпеки при роботі з рідкими продуктами розподілу повітря.

Рідкі продукти поділу повітря мають дуже низькі (кріогенні) температури, легко випаровуються при звичайних температурах, збільшуючи у багато разів свій обсяг.

Робота з рідкими продуктами поділу повітря пов'язана з такими небезпеками:

- 1) небезпека обмороження обслуговуючого персоналу;
- 2) небезпека швидкого закипання із створенням тисків у замкнених судинах;
- 3) небезпека руйнування конструкцій з вуглецевої сталі та інших нехолодостійких металів та матеріалів;
- 4) при використанні рідкого азоту для охолодження виробів відбувається упарювання рідини, що супроводжується підвищенням концентрації кисню. При досягненні концентрації кисню в рідині до 30% виникають такі ж небезпеки, як при застосуванні рідкого кисню.

Щоб уникнути низькотемпературних опіків, не можна допускати потрапляння рідини та газу на відкриті ділянки тіла, в очі. Необхідно уникати всіляких контактів з киплячою рідиною, що розбризкується. При попаданні рідкого продукту слід негайно добре промити уражене місце.

Зі зрідженими газами працюють у спецодязі. У закритих приміщеннях має бути надійна вентиляція та налагоджений контроль за вмістом газу у навколишньому середовищі.

Вибухонебезпечність та пожежостійкість

У ПРУ вибухи відбуваються у тих місцях, де випаровується рідкий кисень або збагачене киснем повітря. При википанні в рідкому кисні накопичуються висококиплячі вибухонебезпечні домішки повітря. Коли вміст домішок рідини перевищує нижню межу її вибуховості або розчинності в рідкому кисні, утворюється вибухонебезпечна суміш, вибух якої може призвести до руйнування апарату або його частини.

Вибухобезпечність експлуатації повітророздільних блоків забезпечується розміщенням установок у місцях, де вміст вибухонебезпечних домішок у повітрі не перевищує граничних величин для даного типу установок; очищенням повітря та технологічних потоків від вибухонебезпечних домішок; підтримкою в апаратах, в яких відбувається кипіння рідкого кисню, режиму роботи, що унеможливує відкладення вибухонебезпечних домішок на теплопередаючих поверхнях; регулярним контролем вмісту домішоку рідкому кисні та вживання належних заходів у разі виникнення вибухонебезпечних умов.

Знежирення обладнання, що працює у середовищі кисню.

Необхідність ретельного очищення поверхонь обладнання, що стикаються з киснем, від олії та жиру викликана вибухонебезпечністю системи кисень.

Знежирення обладнання проводять при виготовленні виробів, а також після їх збирання та монтажу.

Крім того, знежирення здійснюють періодично під час експлуатації обладнання, якщо на його поверхнях, що працюють в контакті з киснем, можливе відкладення олії. Технологію знежирення регламентовано галузевим стандартом.

Для знежирення застосовують органічні розчинники та водомиючі розчини.

Необхідність знежирення виробів після виготовлення, монтажу та ремонту, а також при експлуатації визначається відповідною конструкторською та технологічною документацією. Виріб у зборі можна не знежирювати, якщо деталі та вузли знежирені після виготовлення, а при зберіганні та складанні виключалося забруднення поверхонь, що працюють у середовищі кисню.

Знежирення органічними розчинниками та водними миючими розчинами можна здійснювати заповненням внутрішніх поверхонь або зануренням у ванни; циркуляцією миючого засобу в виробах, що промиваються; конденсацією парів розчинників у виробах, що промиваються; струминним очищенням; протиранням забруднених місць; ультразвуковим очищенням.

Якість знежирення на внутрішній поверхні виробів визначають зі зміни вмісту олії в розчиннику після знежирення. Якість знежирення вважається задовільною, якщо при повторному знежиренні методами заповнення або циркуляції вмісту олії в розчиннику зростає не більше ніж на 20 мг/дм³. Знежирення методом конденсації закінчують при вмісті олії в розчиннику (зливається з виробу) менше 20 мг/дм³. Якість знежирення відкритих поверхонь може бути перевірена шляхом протирання або оглядом поверхні за допомогою люмінесцентних приладів.

Хлоровані вуглеводні відносяться до підгрупи Б групи IV сильнодіючих отруйних речовин (СДОР). При їх зберіганні повинні виконуватись вимоги "Санітарних правил проектування обладнання, складів для зберігання сильнодіючих отруйних речовин (СДОР)

Приміщення цеху поділу, компресії продуктів поділу повітря (машинне відділення), апаратне відділення, вентильовані підвали під блоком поділу повітря, камера фільтрів (повітряних) за категорією приміщень за вибухонебезпечністю та пожежною небезпекою за ОНТП 24-86 відносяться до категорії Д. За ступенем вогнестійкості будівельних конструкцій – II, IIIа. За

класом вибухонебезпечних та пожежонебезпечних зон за ПУЕ – вибухопожежонебезпечний. Додаткові умови: у цеху поділу необхідно проведення аналізу на вміст кисню у газонебезпечних місцях один раз на зміну; в апаратному відділенні підвали забезпечуються витяжною примусовою вентиляцією, яка включається персоналом, що обслуговує, за сигналом автоматичного газоаналізатора.

Довиробнича допомога

Як і в житті кожного з нас трапляються різного роду травми, забої переломи і т.д. Цей розділ присвячений тому, як допомогти людині в тих чи інших ситуаціях надзвичайного стану. Будь то через незнання або через недбалість робітників ми повинні їм допомогти в тій чи іншій ситуації. Підприємство приховує у собі масу різноманітних небезпек. Наша - мета звести цей фактор ризику до мінімуму, а якщо він все-таки сталося то як допомогти іншим і - собі самому. Холод здавалося – що може статися, але за дуже низьких температурах може бути сумні наслідки -190°C чи $+190^{\circ}\text{C}$ насправді ми відчуємо різниці а постраждає тіло людини це в першу чергу людина, це добре спрацьована команда відповідно і згуртованість роботи організації в цілому.

Перша допомога при обмороженні

При кріогенному обмороженні необхідно, перш за все, зняти одяг, що утруднює кровообіг у ураженій ділянці. негайно зробити теплову ванну ураженого місця при температурі води $40-45^{\circ}\text{C}$. Не слід проводити сухе відігрівання або використовувати воду з температурою вище 46°C , оскільки в цьому випадку можливе посилення ураження тканин, що постраждали.

Якщо вражена більшість поверхні тіла, чим викликано загальне зниження температури тіла, то потерпілому потрібно створити загальну ванну, що зігріває. При цьому необхідно мати на увазі, що постраждалий може впасти у шоковий стан.

Безпосередньо після обморожування уражені поверхні тіла безболісні, здаються воскоподібними і мають блідо-синій відтінок. Після відтавання вони стають болючими і з'являються бульбашки. Рани, що утворюються при їх руйнуванні, дуже схильні до занесення інфекції. Тому не слід робити негайного розморожування, якщо поразка відбулася в умовах, коли потерпілого не може бути негайно госпіталізовано.

Розморожування слід проводити протягом 15-60 хв доти, поки забарвлення ураженого місця не стане рожевим або червоним. При відтаванні рекомендується використовувати анестезуючі засоби для зменшення хворобливості. По можливості розморожування слід проводити під наглядом лікаря.

Якщо розморожування уражених частин відбулося до того, як могла бути надана медична допомога, то відігрівання проводити не слід. У цьому випадку необхідно закрити уражену поверхню сухою стерильною тканиною, а поверх неї покласти щільну захисну пов'язку. Після госпіталізації постраждалому необхідно зробити протиправцеве щеплення.

Неприпустимо давати постраждалому алкогольні напої, дозволяти курити, оскільки це погіршує кровообіг уражених частин тіла.

Перша допомога при ураженні електричним струмом

Перша долікарська допомога при нещасних випадках від електричного струму складається з двох етапів: звільнення потерпілого від дії струму та надання йому медичної допомоги.

Звільнення потерпілого від дії струму може бути здійснено кількома способами. Найбільш простий і вірний спосіб – це відключення відповідної частини електроустановки. Якщо відключення швидко зробити чомусь не можна, можна при напрузі до 1000 В перерубати дроти сокирою з дерев'яною рукояткою або відтягнути постраждалого від струмоведучої частини, взявшись за його одяг, якщо він сухий, відкинути від нього дріт за допомогою дерев'яної палиці.

При напрузі вище 1000 В слід застосовувати діелектричні рукавички, боти та у необхідних випадках ізолюючу штангу або ізолюючі кліщі, розраховані на відповідну напругу.

Заходи першої медичної допомоги постраждалому електричного струму залежить від його стану. Якщо потерпілий у свідомості, але до цього непритомний або тривалий час перебував під струмом, йому необхідно забезпечити повний спокій до прибуття лікаря або терміново доставити до лікувального закладу.

За відсутності свідомості, але дихання, що збереглося, і роботі серця потрібно рівно і зручно укласти потерпілого на м'яку підстилку, розстебнути пояс і одяг, забезпечити приплив свіжого повітря. Слід давати нюхати нашатирний спирт, оббризкувати обличчя холодною водою, розтирати та зігрівати тіло.

Якщо потерпілий погано дихає – рідко, судомно або якщо дихання поступово погіршується, тоді як у всіх цих випадках продовжується нормальна робота серця, необхідно робити штучне дихання.

За відсутності ознак життя треба робити штучне дихання та зовнішній масаж серця.

Штучне дихання має бути розпочато негайно після звільнення потерпілого від дії струму та виявлення його стану. Воно повинне проводитися методом, відомим під назвою "з рота в рот" і полягає в тому, що той, хто надає допомогу, вдує повітря зі своїх легенів у легені постраждалого через його рот. Встановлено, що повітря, що видихається з легенів, містить достатню для дихання кількість кисню. При цьому способом потерпілого укладають на спину, відкривають йому рота і видаляють з рота сторонні предмети і слиз. Для розкриття гортані той, хто надає допомогу, закидає голову потерпілого назад, поклавши під потилицю одну руку, а другою рукою натискає на лоб або тем'я потерпілого до такого ступеня, щоб підборіддя опинилося на одній лінії з шиєю.

Після цього допомагає робить глибокий вдих і з силою видихає повітря в

рот потерпілого. При цьому він повинен охопити своїм ротом весь рот постраждалого і своїм обличчям чи пальцями затиснути йому ніс. Потім той, хто надає допомогу, відкидається назад і робить новий вдих. У цей період грудна клітка потерпілого опускається, і він робить пасивний видих.

За одну хвилину слід робити 10-12 вдування. Вдування повітря можна проводити через марлю, хустку або спеціальну трубку. При відновленні у потерпілого самостійного дихання деякий час слід продовжувати штучне дихання до приведення потерпілого до тями, приурочуючи вдування до початку вдиху потерпілого.

Зовнішній масаж серця має на меті штучно підтримувати в організмі кровообіг та відновити самостійну діяльність серця.

Визначивши промацуванням місце натискання, яке має бути приблизно на два пальці вище м'якого кінця грудини. Надає допомогу кладе на нього нижню частину долоні однієї руки, а потім поверх руки кладе під прямим кутом іншу і натискає на грудну клітку потерпілого, злегка допомагаючи при цьому нахилом свого корпусу. Натискати слід приблизно один раз на секунду швидким поштовхом так, щоб просунути нижню частину грудини вниз у бік хребта на 3-4 см, а у повних людей - 5-6 см. Після цього надає допомогу злегка випрямляється і розслаблює руки, не відбираючи їх від грудей.

Одночасно з масажем серця потрібно виконувати штучне дихання. Вдування треба проводити в проміжках між натисканнями або під час спеціальної паузи через кожні 4-5 натискань. Якщо допомогу надає одна людина, вона зобов'язана чергувати операції: після двох вдування повітря проводити 15 натискань на грудну клітку.

Про відновлення діяльності серця у потерпілого судять за появою в нього власного регулярного пульсу, що не підтримується масажем. Для перевірки пульсу необхідно перервати масаж на 2-3 секунди.

ВИСНОВКИ

Вуглекислотна установка призначена для виробництва трьох видів продукції: зріджений CO₂, що зберігається в газових балонах високого тиску (50 кгс / см²) при температурі навколишнього середовища, зріджений CO₂, що зберігається в балонах-термосах та резервуарах із низькою температурою і тиском, сухого льоду. Установка може бути частиною вуглекислотного цеху, в якому виробляють чистий CO₂, або частиною підприємства, в якому CO₂ є побічним продуктом.

Вуглекислотна установка виконується за індивідуальним проектом в залежності від технічного завдання, що визначає джерела газу, різновиди продукції і її якість. Вуглекислотна установка повинна бути укомплектована контрольно-вимірювальними приладами і приладами регулювання і управління.

Вуглекислотна установка складається з однієї або декількох машин високого тиску або каскадних машин, укомплектованих системами очищення газу, системами енерго- і водопостачання, з обладнанням для розливання газу по сталевим балонів високого тиску або з системами для транспортування великих кількостей зрідженого газу в ізотермічних цистернах.

Машину середнього тиску виконують у каскадному варіанті. Верхній каскад працює на природних робочих речовинах середнього тиску та температур і може бути одноступеневого або двоступеневого типу.. Якщо машину потрібно використовувати також і для виробництва сухого льоду, то потрібен спеціальний компресор. Машини, в яких блоки сухого льоду створюються в спеціальних пресах, виконуються по двохкомпресорних схемою. Зазвичай це машини великої продуктивності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alsultanny Y. A., Al-Shammari N. N. Oxygen Specific Power Consumption Comparison for Air Separation Units // Engineering Journal. —2014. —Vol. 18 (2). —P. 68–80.
2. Дем'яненко Ю.І. Охорона праці під час роботи на установках розділення повітря. Навчальний посібник. – 2006.
3. І.Г. Чумак. Д.Г Нікульшин Холодильні установки. Проектування: Навчальний посібник для вузів. – К.: Вища шк., 1988. – 280с.
4. Хмельнюк М.Г., Кочетов В.П., Форсюк А.В., Жихарева Н.В. Плодоовочесховища: проектування, оптимізація, розрахунки. – Одеса: Бондаренко М.О., 2018. – 228 с.
5. Явнель Б.К. Курсове та дипломне проектування холодильних установок та систем кондиціонування повітря. - 3-тє вид., перероб. та дод. - М.: Агропромиздат, 1989. - 233 с.; іл. – (Підручники та навчальний посібник для технікумів).
6. Т.В. Морозюк, «Теорія холодильних машин та теплових насосів». – Одеса: студія «Негоціант», 2007 -712 с. (З додатком).
7. Гоголін А.А. Оптимальні перепади температур у випарниках та конденсаторах холодильних машин // Холодильна техніка. – 1986. – №4. – С. 18–21.
8. Чумак І. Г., Лагутін А. Є., Кочетов В. П. Холодильна техніка та технологія: стан та перспективи розвитку // Вісник міжнародної академії холоду, №4, 1999, С. 47-50.
9. О. В. Остапенко, О. В. Зімін, І. О. Подмазко, М. Г. Хмельнюк. Шляхи підвищення енергоефективності холодильної установки підприємства харчової промисловості // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – Т. 52, № 6. – С.4-10.
10. Жихарева Н.В., Хмельнюк М.Г. Підвищення ефективності системи охолодження плодоовочесховищ // Вісник міжнародної академії холоду. – 2013. – Вип. 4. – С. 16-20.