

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи

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

Здобувача Даніленко І.О.
(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**

Даніленка Ігора Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Термодинамічний аналіз транскритичного 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: Установка для виробництва зрідженого діоксиду
вуглецю, температури зрідження -20 і -45 °С, масова витрата CO₂ в технологічному процесі 1 кг/с.

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. Аналітична частина.

Енергетичний аналіз схемно-циклових рішень холодильної машини для отримання зрідженого CO₂.

Термодинамічний аналіз впливу тиску у газовому охолоджувачі на енергетичну ефективність циклу.

Тепловий та конструктивний розрахунок повітряного газового охолоджувача. Визначення ємності
резервуару для зберігання зрідженого CO₂. Вибір компресорів для холодильної машини. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Презентація Power Point (11 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 _____ Даніленко І.О.

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)

Даніленко І.О.
(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 _____
Даніленко І.О.
(ПІБ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Утилізація матеріальних та енергетичних скидів енергетичних установок та технологічних процесів промислових підприємств – методи економії ресурсів планети. До таких скидів в першу чергу відносять CO₂. Разом з цим CO₂ у всіх станах широко використовується у всіх галузях промисловості.

Для транспортування та зберігання CO₂ зріджують за допомогою спеціальних установок, тому з'явилися технології зберігання CO₂ за низькими температурами та тисками у резервуарах великої ємності. Враховуючи викладене, тема роботи є актуальною. Мета дослідження - розробка схемно-циклового рішення низькотемпературної холодильної машини для отримання зрідженого CO₂, що є витягом з димових газів. Вирішені завдання: виконано аналіз існуючих технологічних схем витягу CO₂ з димових газів, розроблено спосіб синтезу схемно-циклового рішення низькотемпературної установки з отриманням рідкого CO₂; виконано енергетичний аналіз циклу машини високого тиску, виконано вибір головного устаткування машини та системи зберігання зрідженого газу. Об'єктом дослідження є схема та цикл установки високого тиску для отримання зрідженого CO₂. Предметом дослідження є термодинамічні процеси, які здійснюються в елементах установки.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці схеми низькотемпературної холодильної машини з транскритичним циклом CO₂ та різними температурними рівнями отримання зрідженого CO₂.

Спираючись на сучасні дослідження в галузі устаткування для машин високого тиску, запропоновано триступеневі машини з отриманням зрідженого CO₂ на рівні -45°C та -20°C та відведенням тепла на рівні температур, вище за критичну, у газовому охолоджувачі. У машині перевагу віддано газовому охолоджувачу - мідному ребреному теплообміннику для роботи з високою температурою та тиском, який забезпечує високу енергетичну ефективність процесу теплопередавання і експлуатаційну надійність всієї холодильної установки

Розглянуто можливість компанувати установку на основі компресорів, що працюють на CO₂ / без змащення для отримання чистого харчового CO₂

Ключові слова: низькотемпературна триступенева машина, транскритичний цикл, зрідження CO₂, термодинамічний аналіз.

SUMMARY

Utilization of material and energy discharges of power plants and technological processes of industrial enterprises - methods of saving planetary resources. Such discharges primarily include CO₂. However, CO₂ is widely used in all industries in all industries.

For transportation and storage, CO₂ is liquefied using special units. therefore, technologies for storing CO₂ at low temperatures and pressures in large tanks have appeared. Given the above, the topic of the work is relevant. The purpose of the study is to develop a circuit-cycle solution of a low-temperature refrigeration machine to obtain liquefied CO₂, which is an extract from flue gases. The tasks are solved: the analysis of the existing technological schemes of extraction of CO₂ from flue gases is executed, the way of synthesis of the circuit-cycle decision of low-temperature installation with reception of liquid CO₂ is developed; energy analysis of the high pressure machine cycle was performed, the choice of the main equipment of the machine and the liquefied gas storage system was performed. The object of the study is the scheme and cycle of high pressure installation to produce liquefied CO₂. The subject of research is thermodynamic processes that are carried out in the elements of the installation.

The scientific novelty of the study is to develop a scheme of low-temperature refrigeration machine with a transcritical CO₂ cycle and different temperature levels of liquefied CO₂.

Based on modern research in the field of equipment for high-pressure machines, three-stage machines with liquefied CO₂ at the level of -45oC and -20oC and heat dissipation at temperatures above the critical level in a gas cooler have been proposed. The car prefers a gas cooler - a copper finned heat exchanger for operation with high temperature and pressure. which provides high energy efficiency of the heat transfer process and operational reliability of the entire refrigeration unit The possibility to combine the plant on the basis of compressors running on CO₂ / without lubrication to obtain pure food CO₂

Key words: low-temperature three-stage machine, transcritical cycle, CO₂ liquefaction, thermodynamic analysis.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми.....	3
1.2. Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженого CO ₂ та сухого льоду.....	14
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
2.1. Енергетичний аналіз схемно-циклових рішень холодильної машини для отримання зрідженого CO ₂	19
2.2. Термодинамічний аналіз впливу тиску у газовому охолоджувачі на енергетичну ефективність циклу.....	30
2.3. Тепловий та конструктивний розрахунок повітряного газового охолоджувача	33
2.4. Визначення ємності резервуару для зберігання зрідженого CO ₂	40
2.5. Вибір компресорів для холодильної машини.....	44
3. ВИСНОВКИ.....	49
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	51
5. ЛІТЕРАТУРА.....	60

ВСТУП

Актуальність теми.

Утилізація матеріальних та енергетичних скидів енергетичних установок та технологічних процесів промислових підприємств – методи економії ресурсів планети та забезпечення її стабільного екологічного стану. До таких скидів в першу чергу відносять діоксид вуглецю, CO₂. Разом з цим діоксид вуглецю, CO₂, у всіх своїх станах широко використовується практично у всіх галузях промисловості і агропромислового комплексу.

В світовій практиці значна увага приділяється створенню устаткування для постачання різних галузей промисловості CO₂. Для транспортування та зберігання CO₂ зріджують за допомогою спеціальних установок. Схемні і циклові рішення установок для отримання зрідженого CO₂ та його зберігання в малих резервуарах (балонах) високих тисків до 6,0-7,0 МПа мають багаторічну історію [1]. На сучасному рівні промислового виробництва такі технології не задовольняють споживачів, тому з'явилися технології зберігання CO₂ за низькими температурами та тисками у резервуарах великої ємності [2]. Розвиток компресоробудування для CO₂ робочої речовини супроводжує розвиток галузі 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 установок отримання зрідженого CO₂ та зберігання його за низькими тисками та температурами тривалий час без значних втрат. Враховуючи викладене, тема роботи є актуальною.

Мета та задачі дослідження. Розробка схемно-циклового рішення низькотемпературної холодильної машини для отримання зрідженого діоксиду вуглецю, що є витягом з димових газів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз існуючих технологічних схем витягу діоксиду вуглиця з димових газів,
- розробити спосіб здійснення синтезу схемно-циклового рішення низькотемпературної установки з отриманням рідкого CO₂;
- виконати енергетичний аналіз циклу машини високого тиску,;
- виконати вибір головного устаткування машини та системи зберігання зрідженого газу

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

Предметом дослідження є термодинамічні процеси, які здійснюються в елементах установки.

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 компресорної холодильної машини з транскритичним циклом для виробництва зрідженого діоксиду вуглецю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

- запропоноване схемно-циклове рішення низькотемпературної холодильної машини є підставою для практичної реалізації машин з виробництва зрідженого діоксиду вуглецю з використанням обладнання, арматури і систем автоматики, що випускаються світовими фірмами для роботи з CO₂.

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 24 рисунків, 9 таблиць, список інформаційних джерел з 23 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

Діоксид вуглецю в об'ємі промислового виробництва розглядають з двох позицій:

- робочої речовини холодильних машин та теплових насосів;
- продукту технологічного процесу отримання зрідженого CO₂ та «сухого льоду».

Основні переваги CO₂ як *робочої речовини* позначені в порівнянні з існуючими альтернативами:

- велика об'ємна продуктивність і пов'язані з цим зменшені масогабаритні характеристики елементів машини;
- низька критична температура дозволяє працювати в надкритичній області без фазового переходу;
- коефіцієнт тепловіддавання на 60 ... 70% вищий, ніж у інших робочих речовин;
- не вступає в реакцію з металами;
- добре розчиняється з поліефірним маслом;
- потенціал руйнування озонового шару
- потенціалу глобального потепління
- не горить.

У холодильних машинах з CO₂ в якості робочої речовини реалізуються одноступеневі, двоступеневі, каскадні цикли з процесами в надкритичній і двофазній областях.

Одноступеневі холодильні машини з надкритичним циклом CO₂ використовують як середньотемпературні (температури в охолоджуваному об'єкті). Вони працюють ефективно, якщо температура навколишнього середовища стабільна і вище критичної температури CO₂. Одноступеневі машини з надкритичним циклом працюють як високотемпературні в транспортних системах кондиціонування повітря [3].

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. [4].

У каскадних машинах CO₂ використовують як у верхньому, так і в нижньому каскаді. При використанні CO₂ в нижньому каскаді можна створювати високоефективні машини до -50°C. При використанні CO₂ в верхньому каскаді можна створювати низькотемпературні машини з вуглеводнями в нижньому каскаді до -80°C.

Розглянуто каскадну машину з речовинами R744 і R290, з R744 в верхньому каскаді і циклом в надкритичній області. [5].

Відомо використання R744 одночасно в обох каскадах. Верхній каскад працює по надкритичному циклу, нижній - по циклу в області температур нижче потрійної точки (trans - triple cycle). Дроселювання в нижньому каскаді здійснюється в двофазну зону «пар-тверде тіло» з відкладанням сухого льоду всередині випарника [6].

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 [7], теплообмінні апарати з тиском 100 ... 1000 бар [8].

Діоксид вуглецю як продукт технологічного процесу отримання зрідженого CO₂ та «сухого льоду» класифікують на ринку продукції[2].:

- 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 CO₂ припадає 10% всього ринку технічних газів, що ставить цей продукт в один ряд з основними продуктами розділення повітря.

Фізичні властивості

Густина при нормальних умовах 1,97 кг / м³. При атмосферному тиску діоксид вуглецю не існує в рідкому стані, переходячи безпосередньо з твердого стану в газоподібний. Твердий діоксид вуглецю називають «сухим льодом». При підвищеному тиску і звичайних температурах газ переходить в рідину, що використовується для його зберігання.

Застосування [2]:

У харчовій промисловості діоксид вуглецю використовується як консервант і позначається на упаковці під кодом E290, а також в якості розпушувача тіста.

Рідка харчова вуглекислота - зріджений вуглекислий газ, що зберігається під високим тиском (~ 6,5-7,0 МПа). Безбарвна рідина.

Балони з рідкою вуглекислою широко застосовуються в якості вогнегасників і для виробництва газованої води і інших напоїв. в балончиках застосовується в пневматичній зброї і як джерело енергії для двигунів в авіамоделювання. CO₂ використовують як захисне середовище при зварюванні дротом

Твердий CO₂ – сухий лід - використовується в льодовиках.

Отримання [2]:

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 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 очищення від шкідливих домішок. 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. Ці солі можуть потрапляти в товарний CO₂, що неприпустимо при його використанні у харчовій промисловості. Основними 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 біогаз. Отримання CO₂ з цих газів є енергоємними процесами [9].

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. В спиртовій та пивній галузях для вловлювання викидів CO₂ розроблені та експлуатуються спеціальні технології [10]. Щоправда, в спиртовій галузі останнє десятиліття отримання CO₂ в процесах бродіння практично не здійснюється.

Робота ряду підприємств та виробництв електроенергії супроводжуються значними викидами CO₂. До таких підприємств відносяться ТЕС, які виробляють електричну та теплову енергію. Викиди CO₂, наприклад, 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. Крім того, слід приймати до уваги устаткування, яке використовується, його довершеність і ефективність технологій вилучення CO₂.

У зв'язку з цим розглянемо основні проблеми технології вилучення CO₂ з димових газів з аналізом їх ефективності [11].

Проблема перша. Об'ємна доля CO₂ у суміші димового газу становить 3-12%. Єдиний економічний спосіб вилучення CO₂ за таких умов є використання водних розчинів абсорбентів, наприклад ,моноетаноламіну. Якщо використовувати інші методи, тоді необхідно здійснити стиснення усього потоку димового газу. Згодом частину роботи стиснення можна повернути, однак в порівнянні з попереднім способом вилучення над-то затратний.

Проблема друга. Великі витрати тепла на регенерацію розчинів абсорбентів, що пов'язано з їх властивостями

Проблема третя. Наявність кисню в димових газах, який викликає корозію конструкційних матеріалів. Кисень потрібно виводити, залишаючи не більше 1,5-3,0% в масі газу.

Проблема четверта. Потрапляння пополу, сажі і золи у розчин призводить до утворення піни і погіршення процесу десорбції.

Проблема п'ята. Наявність комплексу NO_x в димових газах призводить до корозії металів та деградації розчинів. Найбільшу небезпеку створює NO₂, якщо цей компонент опиниться у продуктовому CO₂. У таких випадках необхідне додаткове очищення CO₂ від NO₂.

Проблема шоста. Димові гази потрібно охолоджувати перед подаванням до абсорберів, для чого в системі передбачають використання скрубберів.

З урахуванням викладеного важливо під час вилучення з димових газів CO₂ 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. [12].:

- витяг CO₂ до згоряння палива.
- згоряння палива в осередку чистого кисню,
- витяг CO₂ після згоряння палива

При впровадженні вказаних процесів і доповнення їх блоками очищення та зрідження CO₂ можна видавати як продукт.

Витяг CO₂ до згоряння палива (рис.1) засновано на використанні фізичної або хімічної сорбції.

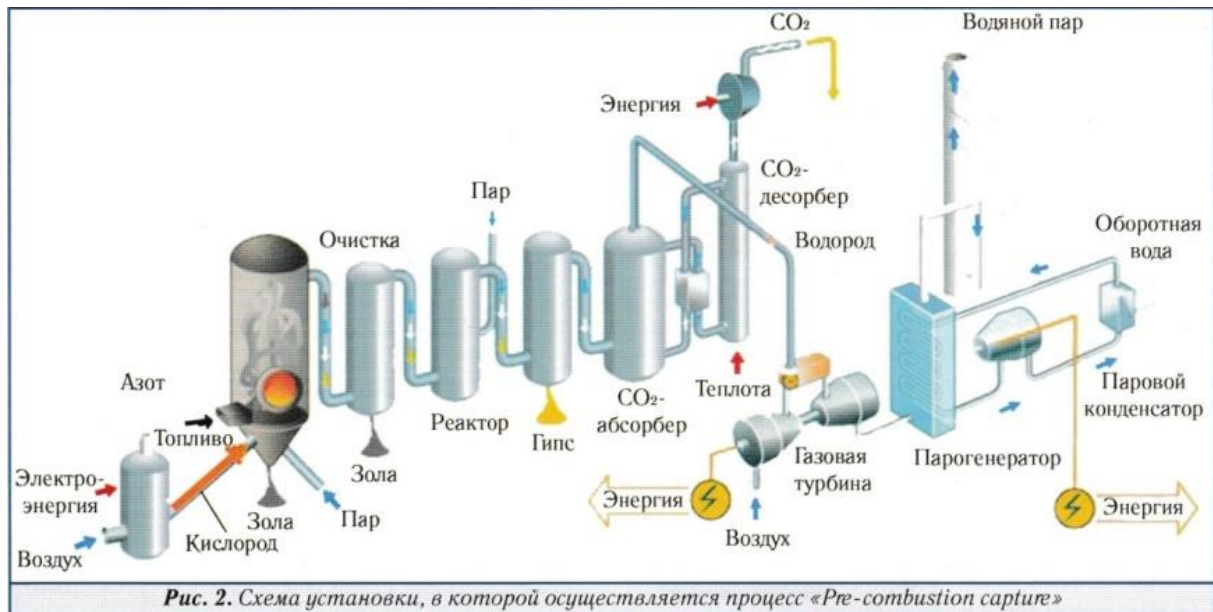


Рис.1. Технологічна схема установки, у якій здійснюється процес «Pre-combustion capture» [12].

Первинне паливо спрямовується на конверсію у присутності водяної пари. Продукти конверсії палива розділяються на окремі потоки водню, який надходить в енергетичну установку, і CO₂ з невеликими домішками водяної пари та інших компонентів, які спрямовують на утилізацію шляхом стиснення, додаткового очищення та зрідження. Практична реалізація даного способу не знайшла широкого попиту через великі енергетичні витрати та наявність процесу спалювання водню.

Технологія «Oxyfuel» передбачає згоряння палива в осередку чистого кисню (рис.2).

При цьому димовий газ складається майже з чистого CO₂ і пари води. Витяг CO₂ з такого димового газу не має ніяких складнощів. Аналіз основних процесів «Oxyfuel» вказує на високу енергетичну ефективність. На базі цього процесу побудовано експериментальну теплову електростанцію в Німеччині.

За думкою експертів, така технологія буде поширюватися, особливо для тих споживачів, які використовують вугілля у якості палива.

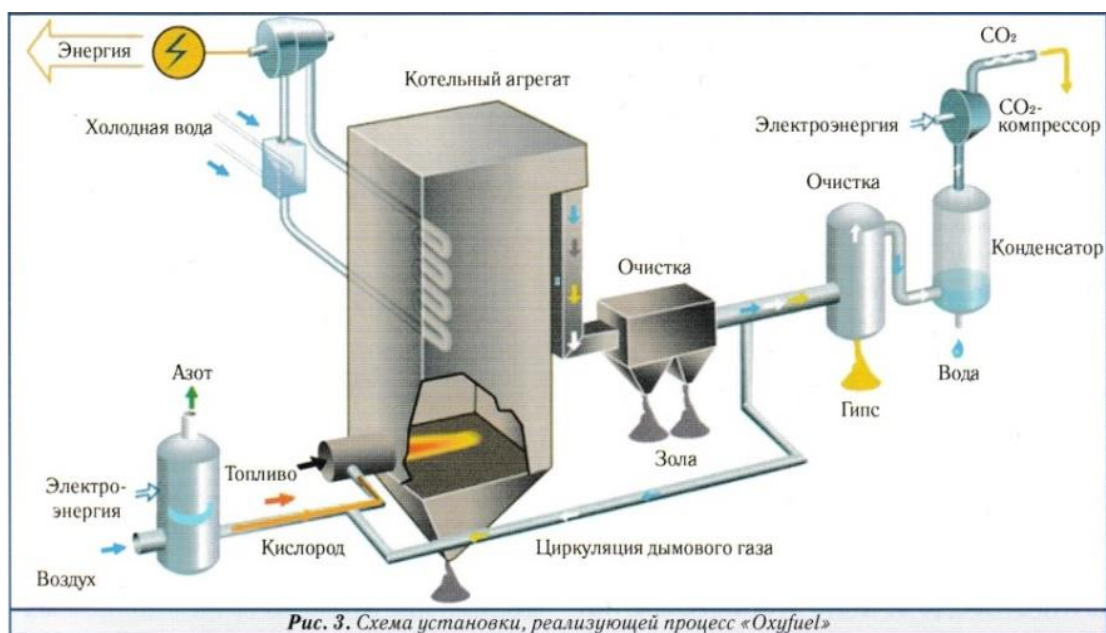


Рис.2. Технологічна схема установки, у якій здійснюється процес «Oxyfuel» [12].

Витяг CO₂ після згоряння палива за технологією «після згоряння палива» (рис.3) , як і до згоряння, базується на хімічній сорбції. Вказаний метод може бути використаним для зниження викидів CO₂ при роботі вже існуючих установок.

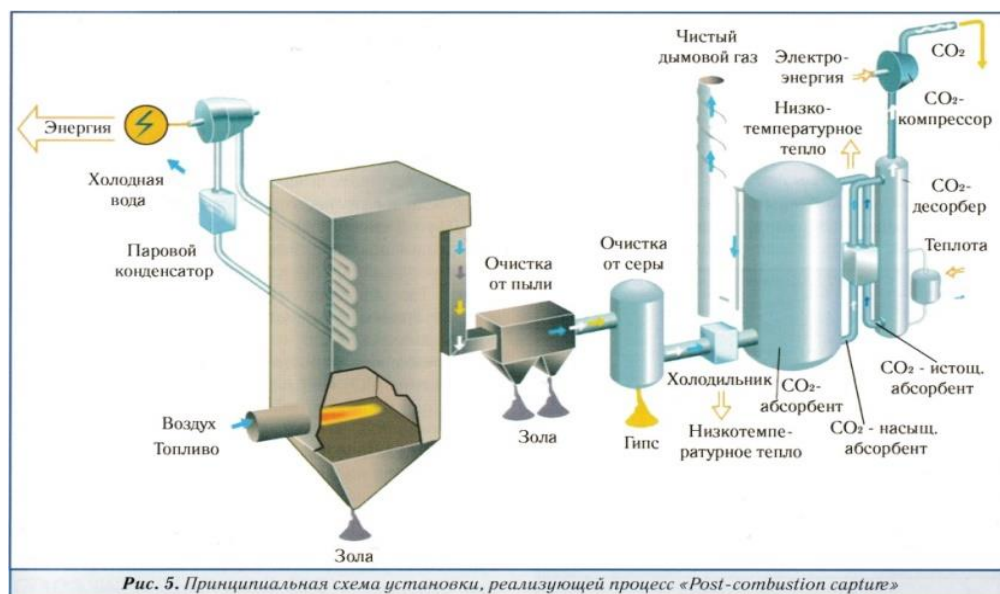


Рис.3. Технологічна схема установки, у якій здійснюється процес «Post-combustion capture» [12].

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

Аналізуючи наведені технології, слід звернути увагу на те, що ілюстративний матеріал, що наведено на рис.1,2,3, закінчується виходом з установки газоподібного CO₂, устаткування для зрідження автори не наводять.

На багатьох підприємствах експлуатуються вуглекислотні установки для отримання зрідженого низькотемпературного діоксиду вуглецю з димових

газів. Такі установки підрозділяють в залежності від способу отримання вихідної сировини. Наприклад, CO₂ 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 CO₂. Провідними фірмами по виробництву устаткування для отримання низькотемпературного CO₂ з димових газів є «Asco carbon dioxide LTD. Union Engieering. Tecno Industriale s.r.l. та ін.

Відзначимо, що у більшості установки будуються на згорянні палива в котлі-теплообміннику, який входить до складу установки. Але установки можуть використовувати димові гази від сторонніх джерел. Виділений CO₂ з димових газів абсорбційними методами в залежності від технічного завдання споживача може зріджуватися або стискатися до потрібного тиску і подаватися в головний технологічний процес. Тому для вирішення задачі про утилізацію CO₂ із димових газів енергетичних установок необхідно використовувати досвід інших компаній з технологій вилучення CO₂.

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

На рис.4 наведено одну з технологічних схем виробництва зрідженого CO₂.

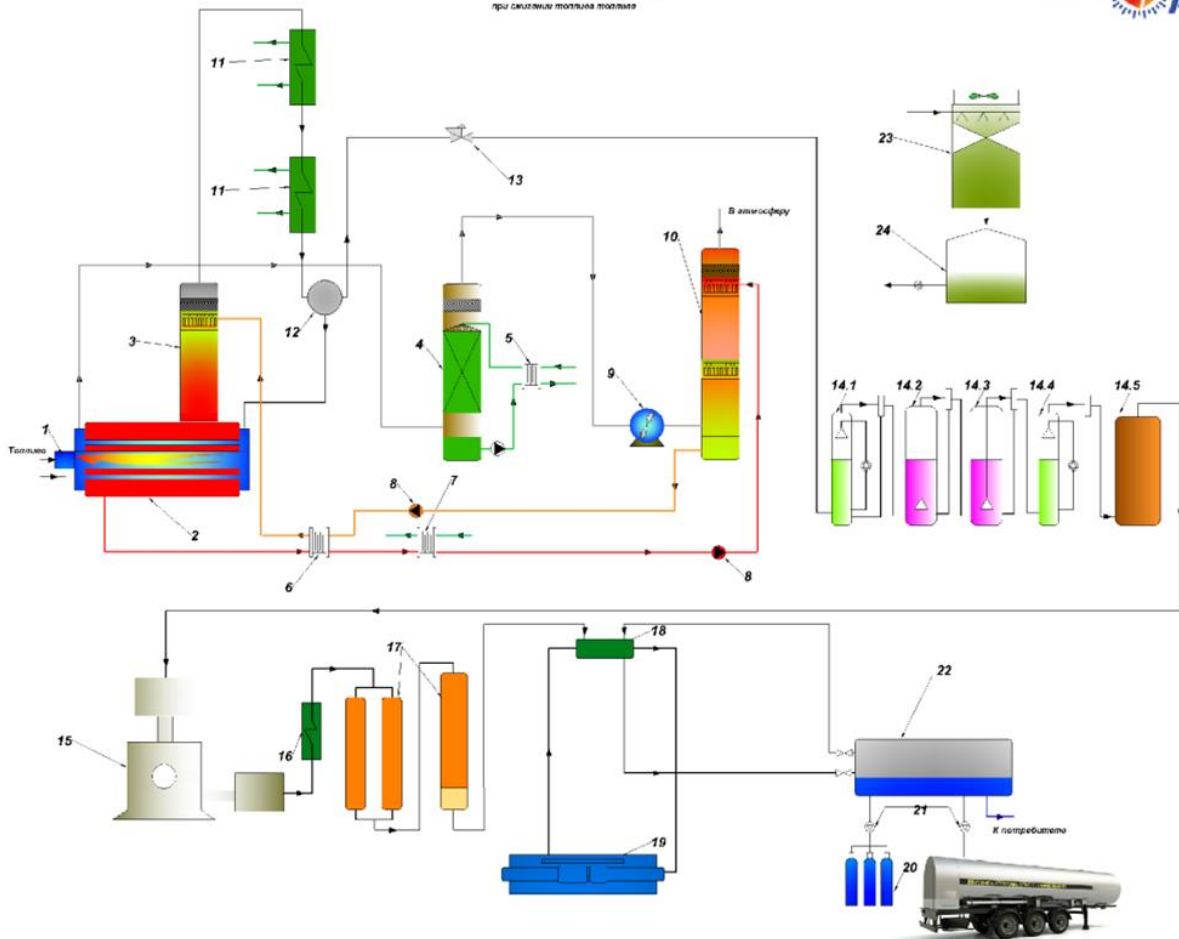


Рис.4. Технологічна схема отримання зрідженого CO₂ [9]:

1-десорбер, 2-скруббер, 3-теплообмінник вода-вода, 4-теплообмінник розчину МЕА, 5-холодильник розчину МЕА, 6-насос МЕА, 7-нагнітач, 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-ресивер зрідженого CO₂, 19-насос CO₂, 20-пост заправки балонів, 21-градирня, 22-аккумулятор води для зворотного використання.

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 їх промивають і охолоджують при прямому контакті з охолоджувальною водою до температури абсорбції 38...40°C. 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 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 в холодильнику газу. Холодильник газу складається з двох послідовно встановлених апаратів. У першому за ходом 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 KMnO₄ і адсорбер низького тиску з активованим вугіллям.

Очищений газоподібний CO₂ стискається компресором без змащення циліндрів, спроектованим і виготовленим з матеріалів, спеціально призначених для роботи з насиченим вологою газоподібним CO₂. Стиснутий CO₂ після кінцевого холодильника компресора охолоджується в додатковому холодильнику холодною водою і після відділення краплинної вологи подається в блок осушення CO₂, який складається з двох адсорберів, що по черзі перемикаються для регенерації. Регенерація адсорбенту проводиться нагрітим сухим CO₂. 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.4 не акцентує на технологічній схемі холодильної машини, закінчуючи виходом з установки газоподібного CO₂. Устаткування для зрідження автори не наводять. Виходячи з цього, проведемо термодинамічний аналіз циклів, які потенційно можуть забезпечити отримання зрідженого CO₂ в масштабі промислового виробництва.

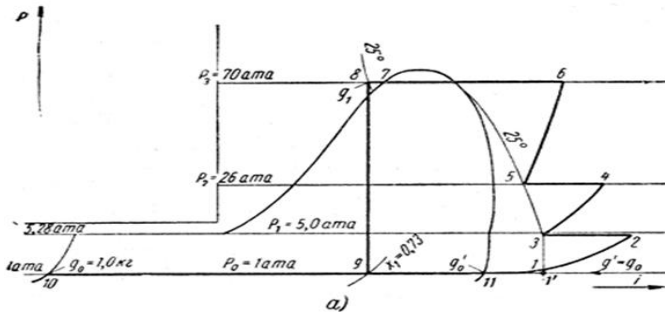
1.2. Термодинамічний аналіз циклів машин для отримання зрідженого CO₂ та сухого льоду

Холодильні компресорні машини є основним типом для виробництва холоду в широкому інтервалі температур в охолоджуваних об'єктах. Для забезпечення роботи систем кондиціювання 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.

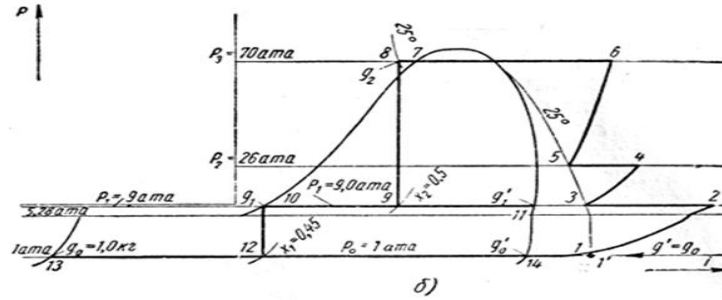
Для отримання сухого льоду використовують цикли, надані на рис.5 в діаграмі стану «тиск-ентальпія», на кожному з них інформація щодо режимів роботи (температури та тиски). Деякі технічні характеристики наведено в таблиці 1 [1]:

Таблиця 1

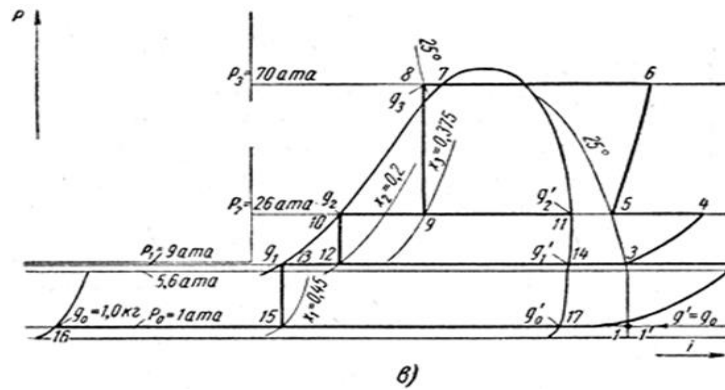
№ пп	Характерна особливість режиму тисків	Тиск конденса ції, МПа	Кількість ступенів дроселюван ня	Вихід сухого льоду за один цикл, %	Питома Витрата енергії, кВт год/т
1(а)	з стисненням у 1 ступені до 0,5 МПа.	7,0	1	27,0	271,0
2(б)	з стисненням у 1 ступені до 0,9 МПа.	7,0	2	27,5	194,5
3(в)	з стисненням у 1 ступені до 0,9 МПа	7,0	3	27,6	169,0
4(г)	з стисненням у 1 ступені до 0,56 МПа	7,0	3	27,8	146,0



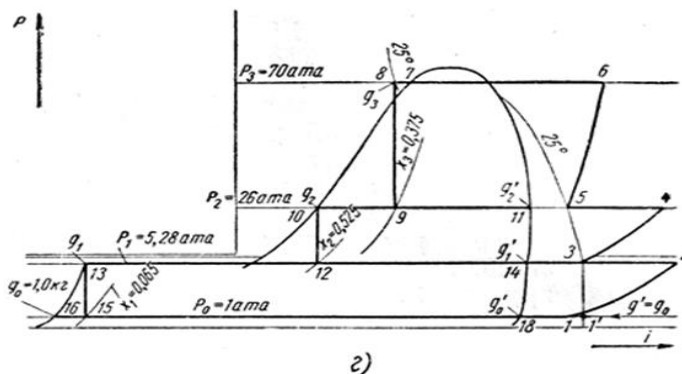
цикл 1



цикл 2



цикл 3



цикл 4

Рис.5. Термодинамічні цикли для виробництва сухого льоду:

1 - цикл високого тиску з одноразовим дроселювання; 2 – цикл високого тиску з дворазовим дроселюванням; 3 – цикл високого тиску з триразовим

дроселюванням та проміжним тиском $p_1 = 0,9$ МПа; 4 – цикл високого тиску з триразовим дроселюванням та проміжним тиском $p_2 = 0,56$ МПа.

З даних таблиці та ілюстрацій циклів (рис.5) бачимо, що в циклах високого тиску (мається на увазі тиск конденсації) вихід сухого льоду однаковий, а за енергетичною ефективністю 1 та 2 цикли є малоефективними, що визначається кількістю ступенів дроселювання. В циклах 3 та 4 здійснюється триразове дроселювання та проміжний тиск такий, що близький до потрійної точки., Такий режим забезпечує зростання виходу продукту і підвищення ефективності циклу..

Усі розглянуті цикли мають багаторічне використання. Усі цикли мають процес конденсації при температурі та тиску, близьких до критичних, і потребують проміжного теплоносія у вигляді охолоджуючої води. Для сучасних умов дефіциту води у багатьох регіонах різних країн, провідні фірми холодильного обладнання пропонують до реалізації цикли з CO₂. без конденсації, так звані «транскритичні». Холодильне обладнання для реалізації циклів широко представлене на світовому ринку. Цикли вирішують великі проблеми в техніці виробництва штучного холоду. Розглянемо транскритичні цикли машини для отримання зрідженого CO₂, використовуючи досвід виробництва сухого льоду.

Зріджений CO₂ зберігають у теплоізольованих ємностях за пониженими тисками 0,9...2,5 МПа з відповідними температурами -45...-10°C. Для запобігання пароутворення від теплоприпливів зовні у ємності розміщено випарник холодильної машини, яка працює на інших холодоагентах і є додатковим обладнанням низькотемпературного сховища [9].

Приймаючи надану інформацію, формуємо термодинамічні цикли для виробництва зрідженого CO₂.

В циклі на рис.6 зріджений CO₂ отримують за тиском 2,0 МПа і температурою -20°C. Цикл здійснюється триступеневою холодильною машиною. Тепло відводиться в навколишнє середовище в теплообміннику –

газовому охолоджувачі з параметрами CO₂ в транскритичній області. Такий цикл забезпечує працездатність установки за високими температурами навколишнього середовища. В циклі передбачено одноступеневе дроселювання.

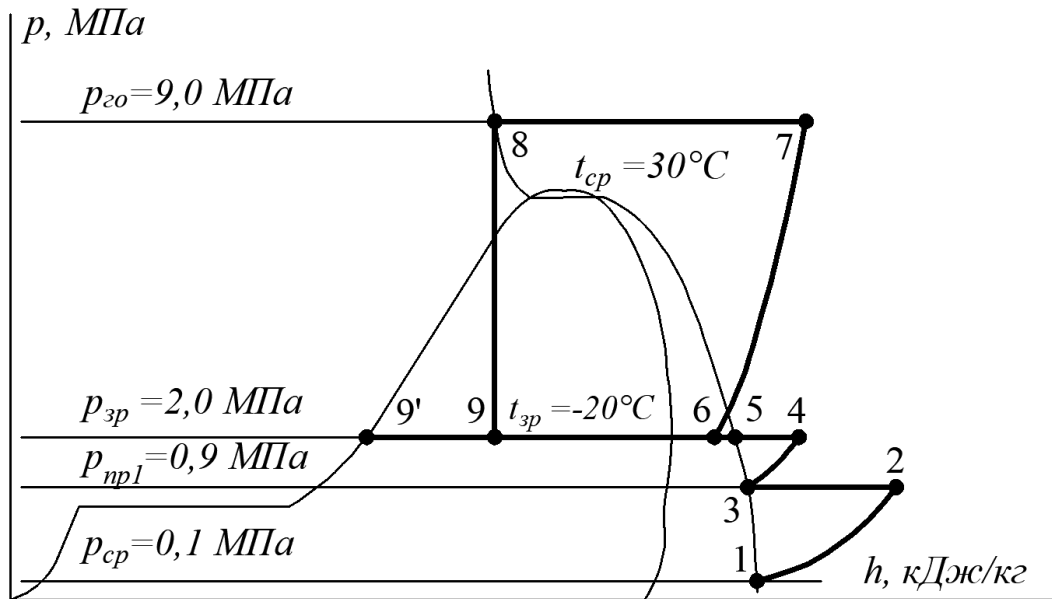


Рис.6. Цикл високого тиску CO₂, зрідження за тиском 2,0 МПа і температурою -20°C в діаграмі $p-h$

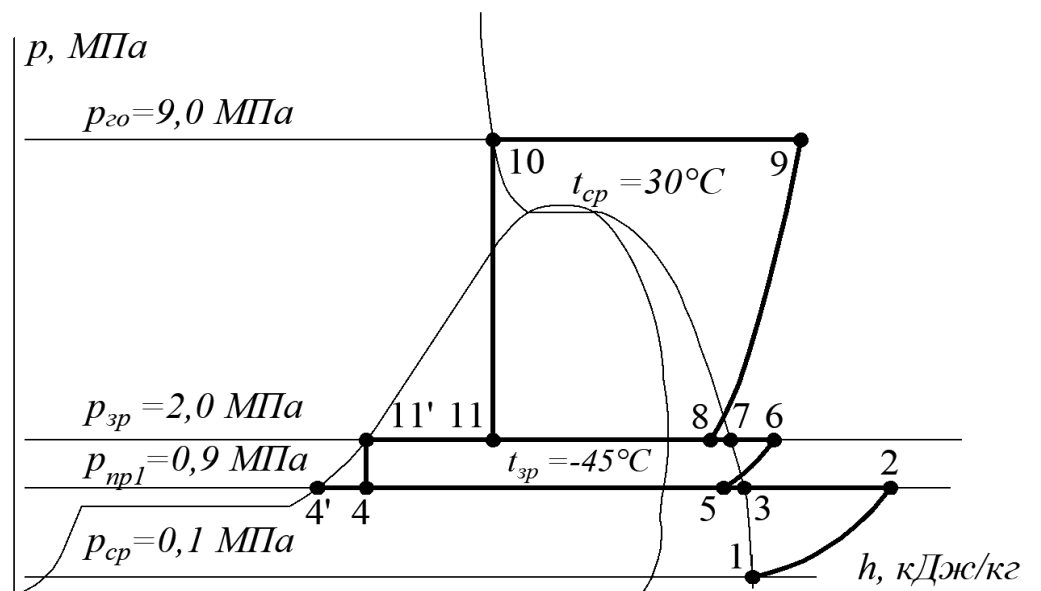


Рис.7. Цикл високого тиску CO₂, зрідження за тиском 0,9 МПа і температурою -45°C в діаграмі $p-h$

В циклі на рис.7 зріджений CO₂ отримують за тиском 0,9 МПа і температурою – 45°C. Цикл здійснюється триступеневою холодильною машиною. Тепло відводиться в навколишнє середовище в теплообміннику – газовому охолоджувачі з параметрами CO₂ в транскритичній області

В циклі передбачено двоступеневе дроселювання.

Отримання споживчих характеристик циклів, розробку схемно-конструктивних показників холодильної машини здійснено на основі термодинамічного аналізу.

Цикл , за яким відбуваються розрахунки, зображено на рис.7 в діаграмі стану $p-h$

Термодинамічні процеси в машині. Очищений CO₂, з параметрами $p_{cp}=0,1\text{МПа}$ та $T_{cp}=30^\circ\text{C}$ стискається до 0,9 МПа в компресорі низького ступеня КНС, проходить теплообмінник ТО1 та прямує в газовий ресивер ГР. Там відбувається змішування з паром з резервуару зберігання зрідженого газу РЗГ, яка утворилася в результаті дроселювання рідини в ДВ2. Суміш стискається в компресорі середнього ступеня КСС до 2,0 МПа, охолоджується навколишнім середовищем в ТО2, поступає в віддільник рідини ВР. Там відбувається змішування його з паром, яка утворилася під час дроселювання газу в ДВ2 після газового охолоджувача. В газовий охолоджувач ГО газ надходить з компресора високого ступеня КВС , де охолоджується навколишнім повітрям. Тиск в охолоджувачі 9,0 МПа, що вищий за критичний, тому процес конденсації в циклі відсутній. Рідина з віддільника рідини дроселюється в ДВ2 до 0,9 МПа . Кінцевим процесом є заповнення резервуару РЗГ.

Енергетичний аналіз циклу.

Вихідні дані для розрахунків:

- розрахункова температура навколишнього повітря $T_{cp}= 25^\circ\text{C}$,
- температура зрідженого газу в резервуарі зберігання, $T_{zp}=-45^\circ\text{C}$,
- тиск в газовому охолоджувачі $p_{zo}=9,0\text{ МПа}$,
- тиск на всмоктуванні в КВС $p_{np2}=2,0\text{ Мпа}$,
- тиск на всмоктуванні в КСС $p_{np1}=0,9\text{ Мпа}$,
- тиск газу після блоку очищення $p_{ex}=0,1\text{ МПа}$,

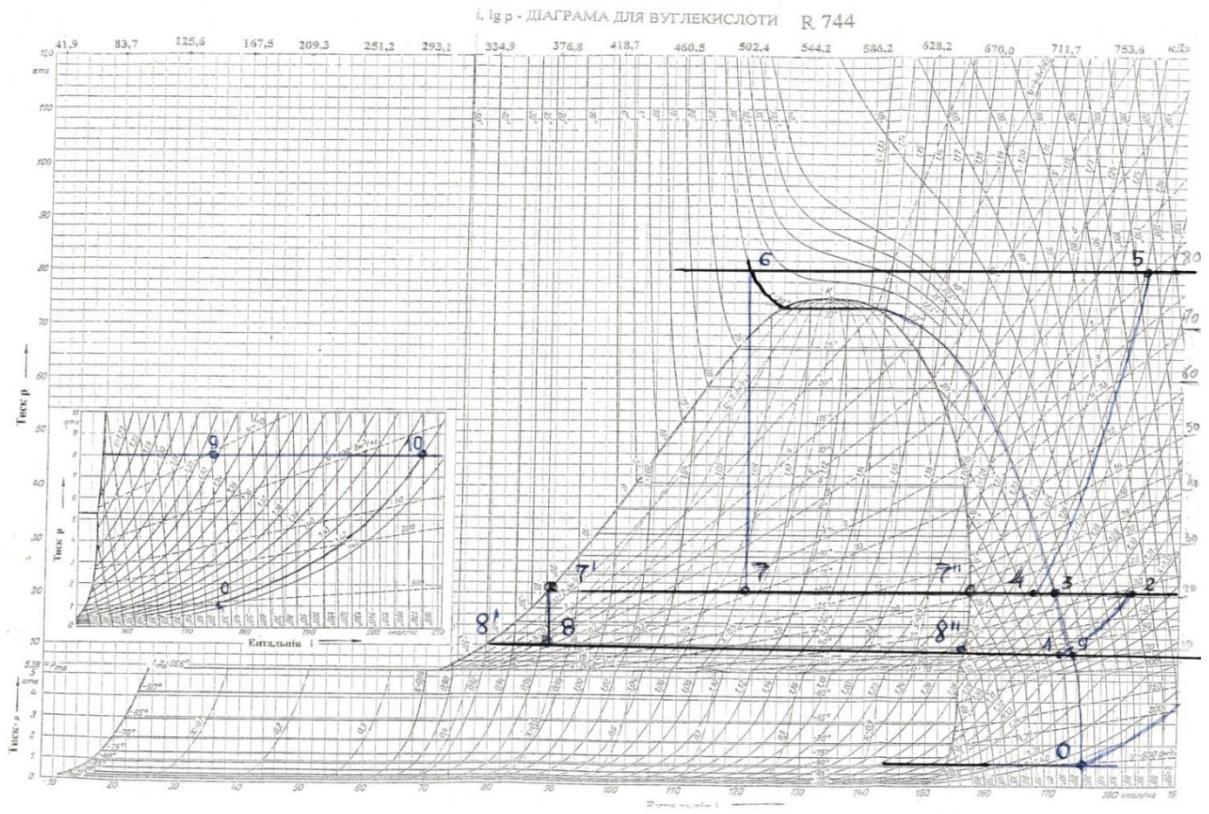


Рис.7. Термодинамічний цикл для розрахунків в діаграмі стану $p-h$

Таблиця 3. Параметри в вузлових точках циклу.

Номер точки	Тиск, p , МПа	Температура, T , °C	Ентальпія, h , кДж/кг	Питомий об'єм v , м ³ /кг
1	0,1	30	733	0,4
2	0,9	170	867	
3	0,9	30	730	
4/4'/4''	0,9	-45	373/327/654	
5	0,9	20	720	
6	2,0	82	771	
7	2,0	30	716	
8	2,0	12	699	0,07
9	9,0	125	787	
10	9,0	30	502	
11/11'/11''	2,0	-20	502/373/654	0,01

Ступінь сухості CO₂ після ДВ1 $x_{11}=0,44$,

Ступінь сухості після ДВ2 $x_4=0,15$,

питома витрата CO₂ через КСС, віднесена до 1 кг CO₂, який надходить з блоку очищення

$$m_{\text{КСС}} = 1 + 0.15 = 1.15,$$

питома витрата CO₂ через КВС, віднесена до 1 кг CO₂, який надходить з блоку очищення

$$m_{\text{КВС}} = 1 + 0.15 + 0.44 = 1,59$$

ентальпія в точці 8.

$$- \quad h_8 = \frac{h_7 + h_{11}x_{11}}{m_{\text{КВС}}} = 699, \text{ кДж/кг},$$

ентальпія в точці 5.

$$- \quad h_5 = \frac{h_3 + h_4x_4}{m_{\text{КСС}}} = 720, \text{ кДж/кг},$$

Питомі характеристики циклу[13].

- Питома адіабатна робота компресора КНС.

$$- \quad w_{\text{КНС}} = h_2 - h_1 = 867 - 733 = 134, \text{ кДж/кг}. \quad (2.1)$$

- Питома адіабатна робота компресора КСС.

$$- \quad w_{\text{КСС}} = m_{\text{КСС}} (h_2 - h_1) = 1,15(771 - 720) = 58,65, \text{ кДж/кг}. \quad (2.2)$$

- Питома адіабатна робота компресора КВС.

$$- \quad w_{\text{КВС}} = m_{\text{КВС}} (h_9 - h_8) = 1,59(787 - 699) = 140, \text{ кДж/кг}. \quad (2.3)$$

- Питоме теплове навантаження на газовий охолоджувач.

$$- \quad q_{zo} = m_{\text{КВС}} (h_9 - h_{10}) = 1,59(787 - 502) = 453,0, \text{ кДж/кг}. \quad (2.4)$$

- Питома масова холодопродуктивність машини.

$$- \quad q_o = (h_3 - h_{4'}) = (730 - 327) = 403, \text{ кДж/кг}. \quad (2.5)$$

Загальні характеристики машини в залежності від продуктивності головного технологічного процесу, в якому утилізується CO₂. [14].

- Холодопродуктивність машини.

$$- \quad Q_o = Gq_o. \text{ кВт} \quad (2.6)$$

- де G – масова витрата газу головного технологічного процесу, кг/с.

- Потужність машини.

$$N_e = N_{кнс} + N_{ксс} + N_{квс} = G(w_{кнс} + w_{ксс} + w_{квс}), \text{кВт} \quad (2.7)$$

- Загальне теплове навантаження на газовий охолоджувач.

$$Q_{zo} = Gq_{zo} \cdot \text{кДж/кг}. \quad (2.8)$$

- За циклом Карно величина роботи зрідження дорівнює

$$w_{КАРНО} = q_o \frac{T_{cp} - T_{zp}}{T_{zp}} = 403 \frac{298 - 228}{228} = 124, \text{кДж/кг} \quad (2.9)$$

- Мінімальна робота зрідження

$$w_{\min} = T_{cp}(s_3 - s_{41}) - (h_3 - h_{41}) = 298(1,32 - 0,92) \cdot 4,19 - 403 = 96,4, \text{кДж/кг} \quad (2.10)$$

- Дійсна робота циклу

$$w_o = w_{кнс} + w_{ксс} + w_{квс} = 134 + 58,65 + 140 = 332,6, \text{кДж/кг} \quad (2.11)$$

- Ефективність циклу зрідження оцінюється коефіцієнтом

$$\frac{w_{\min}}{w_o} = \frac{96,4}{332,6} = 0,29, \quad (2.12)$$

- Робота на одиницю холодопродуктивності зрідження становить

$$\frac{1}{COP} = \frac{w_o}{q_o} = \frac{332,6}{403} = 0,82. \quad (2.13)$$

-

Цикл та схема отримання середньотемпературного зрідженого CO₂ ($T_{zp} = -20^\circ\text{C}$)

Принципову технологічну схему установки, в якій реалізовано цикл з подвійним дроселюванням та отриманням низькотемпературного зрідженого CO₂, зображено на рис.6.

- Аналогом використано цикл 2(б) на рис.5.

-

- **Енергетичний аналіз циклу.**

- **.Вихідні дані для розрахунків:**

- – розрахункова температура навколишнього повітря $T_{cp} = 25^\circ\text{C}$,

Термодинамічні процеси в машині. Очищений CO₂, з параметрами $p_{cp} = 0,1 \text{ МПа}$ та $T_{cp} = 30^\circ\text{C}$ стискається до 0,9 МПа в компресорі низького ступеня КНС, проходить теплообмінник ТО1 та прямує в компресор середнього ступеня КСС. Далі охолоджується навколишнім середовищем в ТО2, поступає у газовий ресивер. Там відбувається змішування його з парою, яка утворилася у резервуарі зберігання. В газовий охолоджувач ГО газ надходить з компресора високого ступеня КВС, де охолоджується навколишнім повітрям. Тиск в охолоджувачі 9,0 МПа, що вищий за критичний, тому процес конденсації в циклі відсутній. Газ після охолоджувача дроселюється до 2,0 МПа. Кінцевим процесом є заповнення резервуару РЗГ.

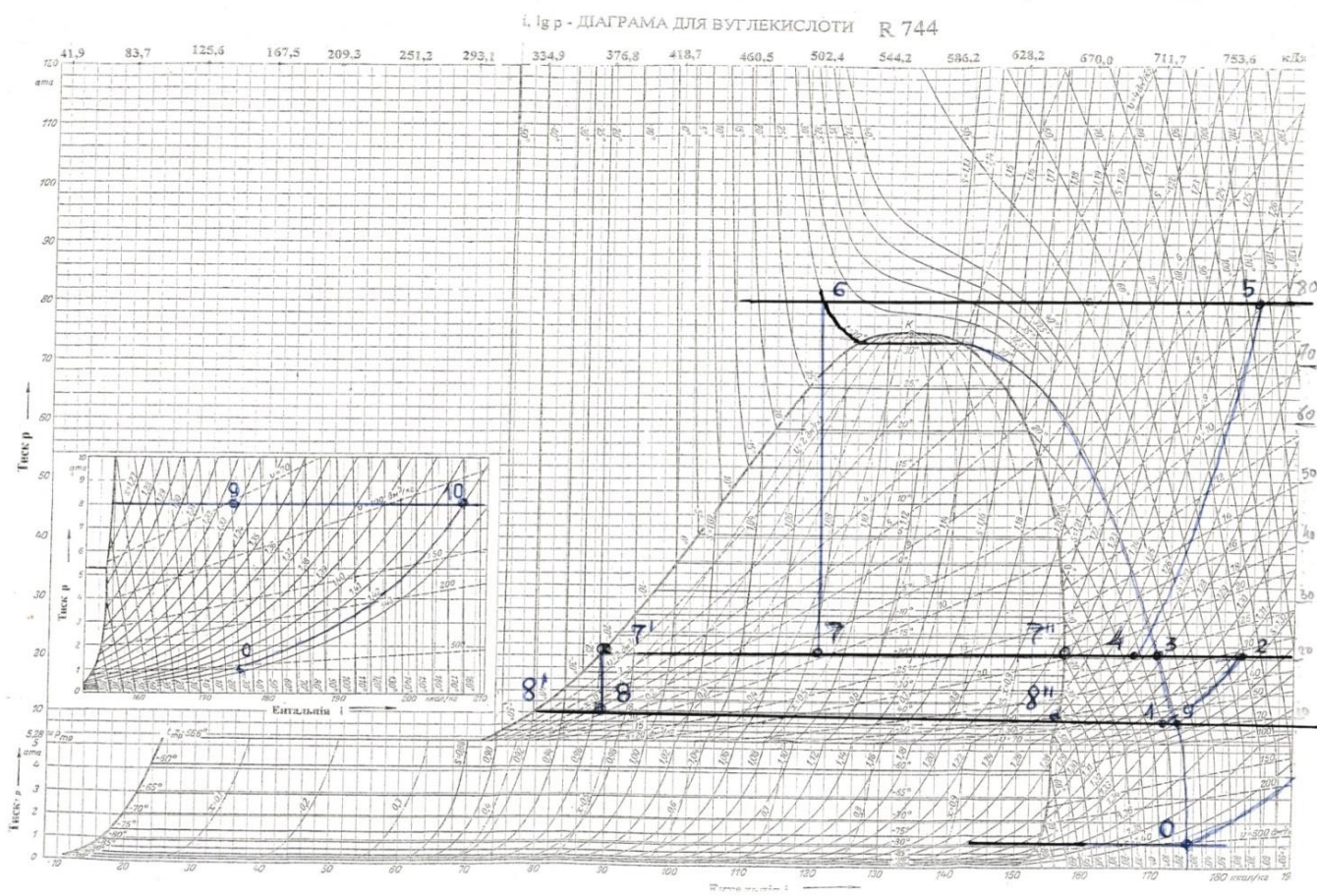


Рис.9. Термодинамічний цикл для розрахунку в діаграмі стану $p-h$

Таблиця 4 . Параметри в вузлових точках циклу.

Номер точки	тиск, p , МПа	Температура, T , °С	Ентальпія, h , кДж/кг	Питомий об'єм v , м ³ /кг
1	0,1	30	733	0,4
2	0,9	170	867	
3	0,9	30	730	
4	2,0	100	787	
5	2,0	30	716	
6	2,0	12	697	0,07
7	9,0	125	787	
8	9,0	30	502/373/654	
9/9/9	2,0	-20	502/373/654	0,01

-ступінь сухості CO₂ після ДВ $x = 0,44$,

-питома витрата CO₂ через КВС, віднесена до 1 кг CO₂, який надходить з блоку очищення

$$m_{\text{КСС}} = 1 + 0.44 = 1.44,$$

- ентальпія в точці б.

$$h_6 = \frac{h_5 + h_{g11} \cdot x_9}{m_{\text{КВС}}} - 697, \text{ кДж/кг}$$

Питомі характеристики циклу.

- Питома адіабатна робота компресора КНС.

$$w_{\text{КНС}} = h_2 - h_1 = 867 - 733 = 134, \text{ кДж/кг.} \quad (2.14)$$

- Питома адіабатна робота компресора КСС.

$$w_{\text{КСС}} = m_{\text{КСС}} (h_4 - h_3) = (787 - 730) = 57,65, \text{ кДж/кг.} \quad (2.15)$$

- Питома адіабатна робота компресора КВС.

$$w_{\text{КВС}} = m_{\text{КВС}} (h_7 - h_6) = 1,44(787 - 697) = 144, \text{ кДж/кг.} \quad (2.16)$$

- Питоме теплове навантаження на газовий охолоджувач.

$$q_{zo} = m_{\text{КВС}} (h_7 - h_8) = 1,44(787 - 502) = 410, \text{ кДж/кг.} \quad (2.17)$$

- Питома масова холодопродуктивність машини.

$$q_o = (h_5 - h_{g1}) = (716 - 373) = 343, \text{ кДж/кг.} \quad (2.18)$$

Загальні характеристики машини в залежності від продуктивності головного технологічного процесу, в якому утилізується CO₂.

-

- Холодопродуктивність машини.

$$Q_o = Gq_o, \text{ кВт} \quad (2.19)$$

- де G – масова витрата газу головного технологічного процесу, кг/с.

- Потужність машини.

$$N_e = N_{кнс} + N_{ксс} + N_{квс} = G(w_{кнс} + w_{ксс} + w_{квс}), \text{ кВт} \quad (2.20)$$

- Загальне теплове навантаження на газовий охолоджувач.

$$Q_{zo} = Gq_{zo}, \text{ кДж/кг.} \quad (2.21)$$

- За циклом Карно величина роботи зрідження дорівнює

$$w_{КАРНО} = q_o \frac{T_{cp} - T_{зр}}{T_{зр}} = 343 \frac{298 - 253}{253} = 61, \text{ кДж/кг} \quad (2.22)$$

- Мінімальна робота зрідження

$$w_{\min} = T_{cp}(s_5 - s_{g1}) - (h_5 - h_{g1}) = 298(1,28 - 0,96) \cdot 4,19 - 343 = 56,56, \text{ кДж/кг} \quad (2.23)$$

- Дійсна робота циклу

$$w_{\partial} = w_{кнс} + w_{ксс} + w_{квс} = 134 + 57,65 + 144 = 335,6, \text{ кДж/кг} \quad (2.24)$$

- Ефективність циклу зрідження оцінюється коефіцієнтом

$$\frac{w_{\min}}{w_{\partial}} = \frac{56,56}{335,6} = 0,168, \quad (2.25)$$

- Робота на одиницю холодопродуктивності зрідження становить

$$\frac{1}{COP} = \frac{w_{\partial}}{q_o} = \frac{335,6}{343} = 0,97. \quad (2.26)$$

За результатами енергетичного аналізу отримали такі дані, таблиця 5

Таблиця 5.

Номер циклу за порядком	Тиск у газовому охолоджувачі	Кількість ступенів дроселювання	Вихід зрідженого CO ₂	$W_{каpно}$	W_{min}	W_{δ}	Коефіцієнт т зрідження	1/COP
1	9,0	2	0,85	124	96,4	332,6	0,29	0,82
2	9,0	1	0,56	61	56,5	335,6	0,168	0,97

За відсутності наявності продуктивності головного технологічного процесу, в графічній формі в залежності від зміни масової продуктивності головного технологічного процесу надано характеристики двох циклів зрідження (рис.10, 11,12.)

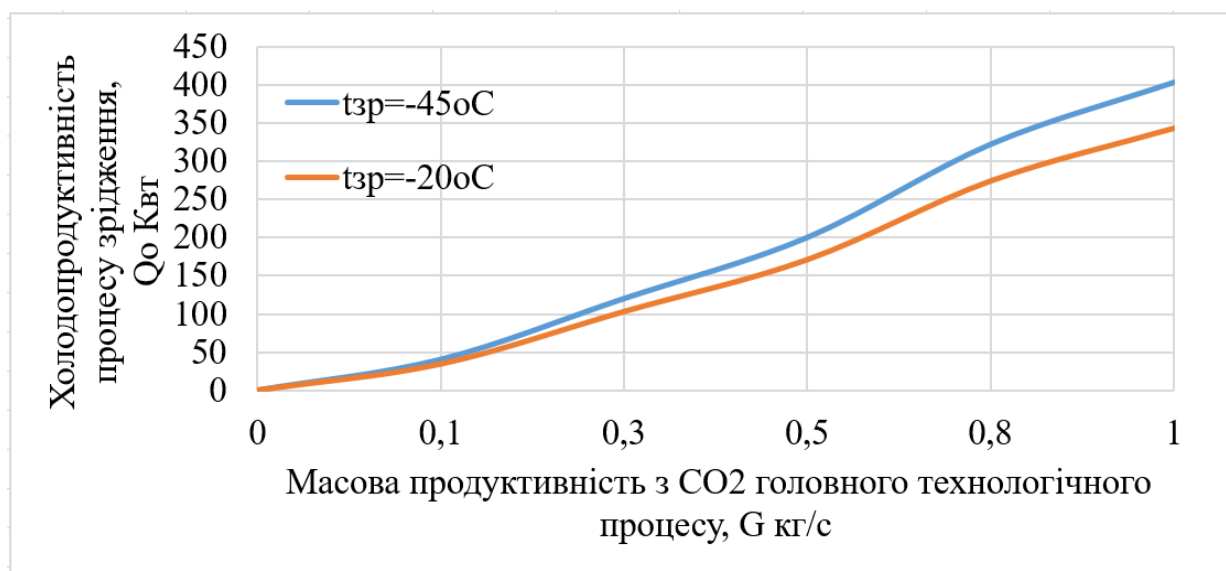


Рис.10. Холодопродуктивність установки зрідження.

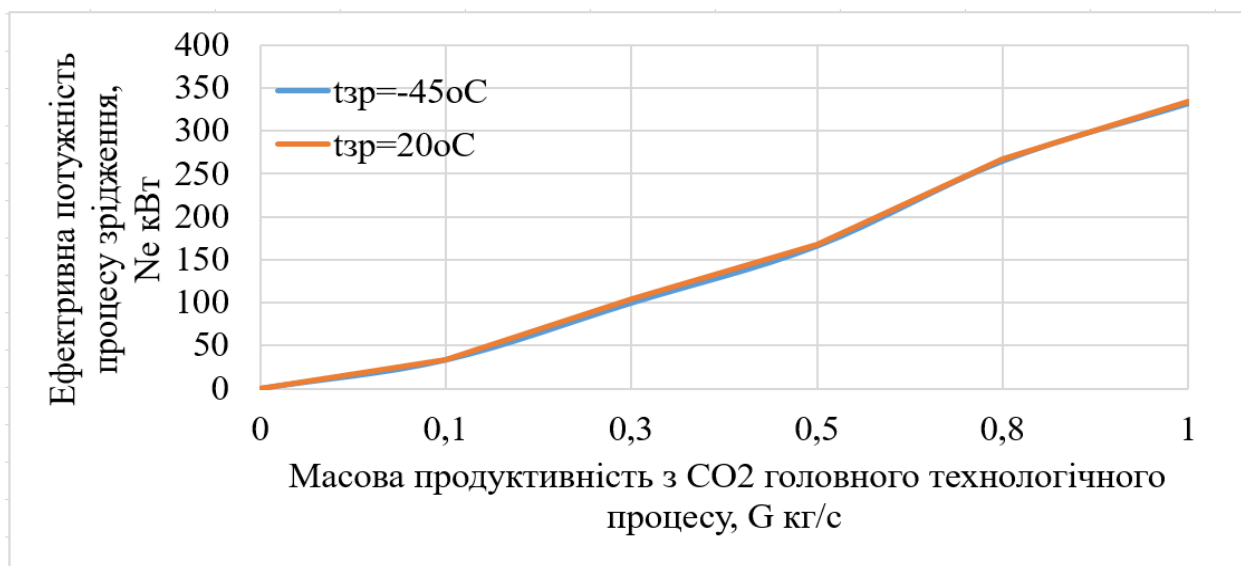


Рис.11. Ефективна потужність установки зрідження

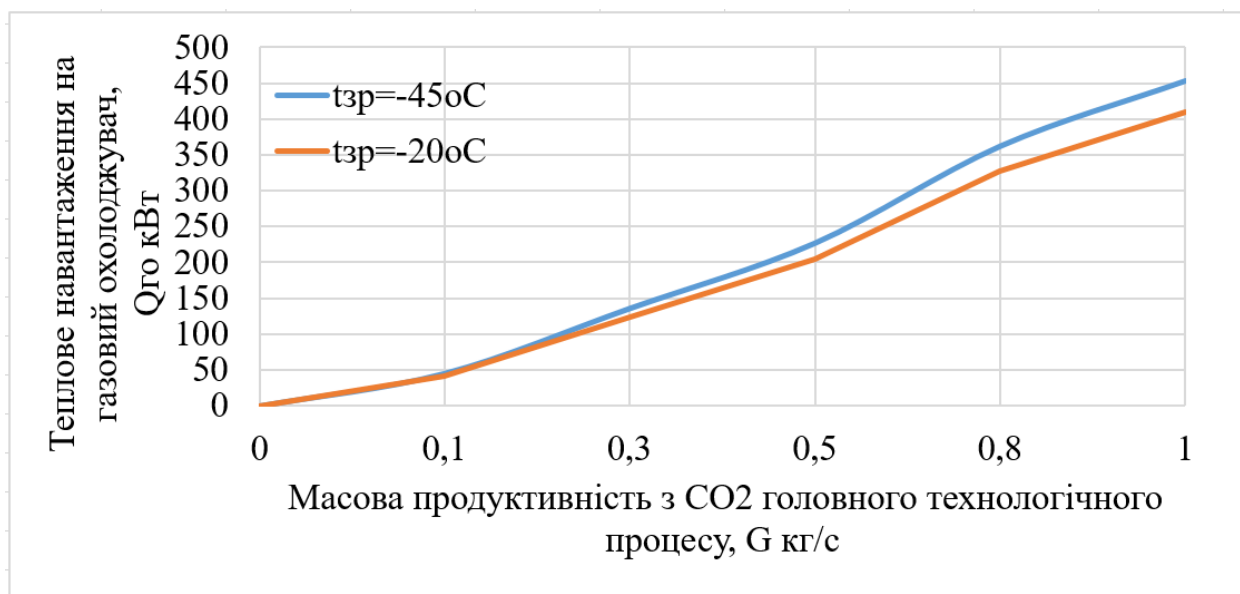


Рис.12. Теплове навантаження на газовий охолоджувач.

Отримані в результаті термодинамічного аналізу характеристики машин зрідження CO₂ не є альтернативою. Кожна машина має право на існування, а замовник вибере варіант після ретельного економічного аналізу прийнятого рішення. Сучасне холодильне обладнання для CO₂ здатне задовольнити реалізацію обраного техніко-економічного рішення.

2.2 Термодинамічний аналіз впливу тиску у газовому охолоджувачі на енергетичну ефективність циклу

На відміну від циклу машини з конденсацією пари функція COP циклу у транскритичній області має максимум, який визначається теплофізичними властивостями CO₂ в межах критичної точки, вибором тиску нагнітання компресора за відомим тиском кипіння робочої речовини у випарнику [15].

Проведемо термодинамічний аналіз ефективності циклу зрідження в залежності від тиску у газовому охолоджувачі з залученням схемно-циклового рішення установки з одноразовим дроселюванням (рис.6)

Зміна режиму роботи установки в залежності від тиску в газовому охолоджувачі за постійною температурою навколишнього середовища ілюстрована в діаграмі стану на рис.13.

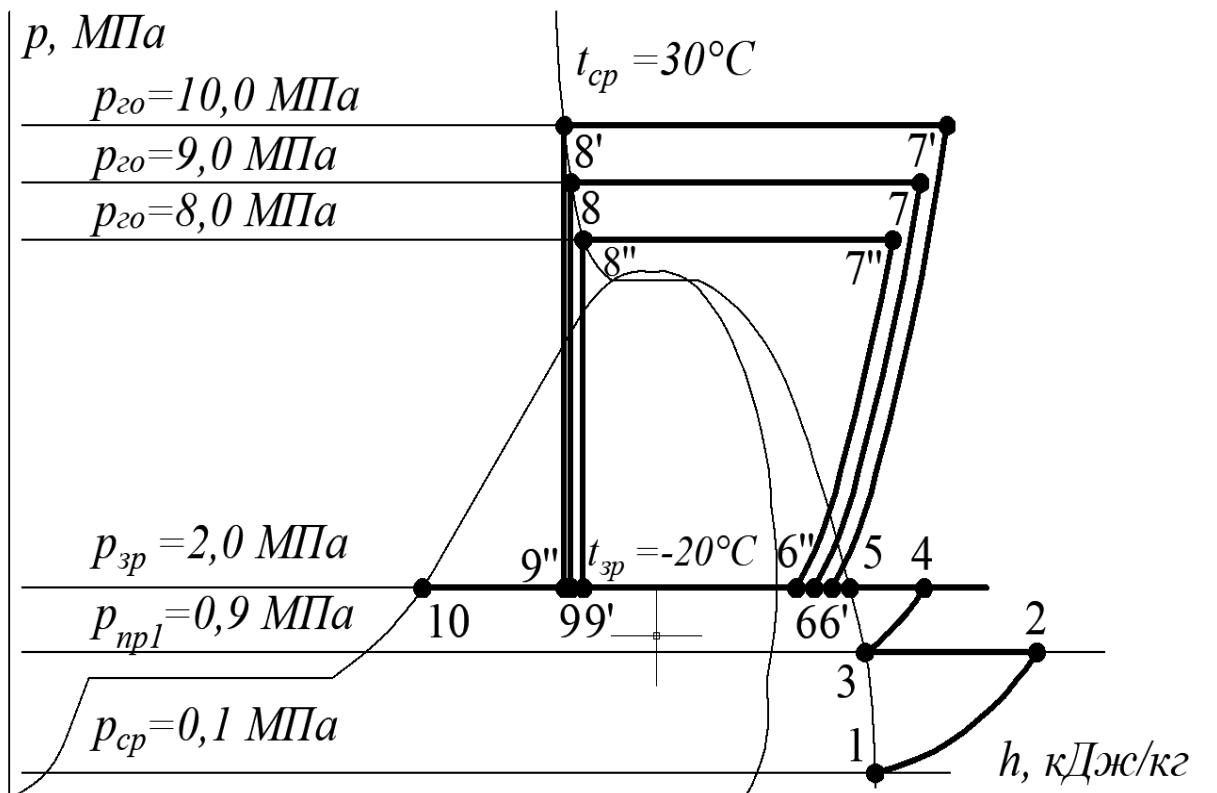
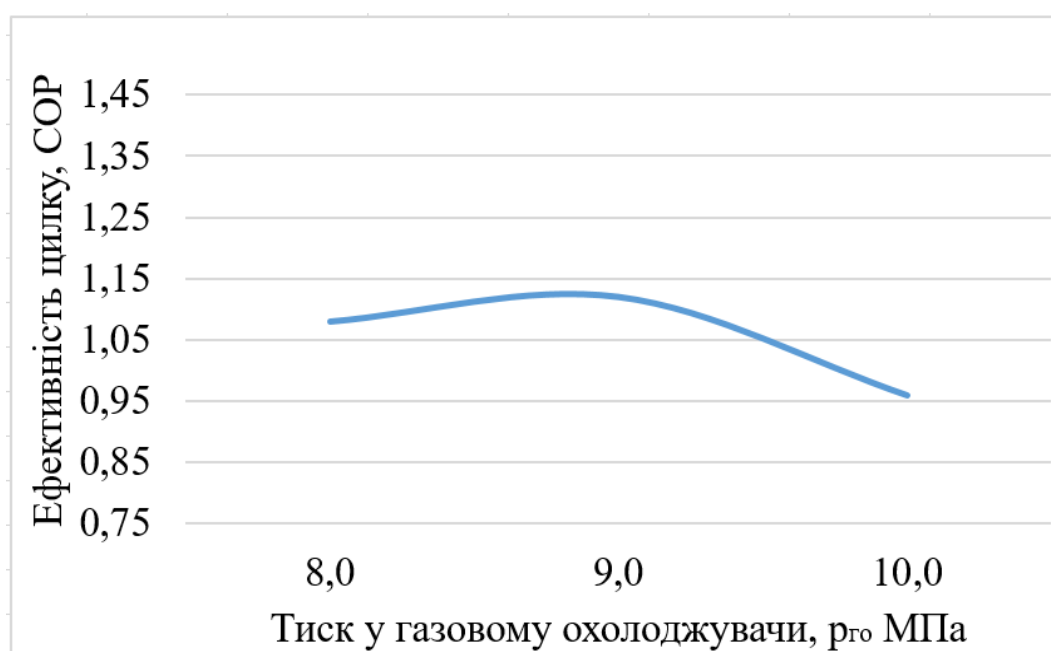


Рис.13.Графічна інтерпретація аналізу впливу тиску у газовому охолоджувачі на енергоефективність циклу зрідження CO₂ в діаграмі стану p - h .

Аналіз параметрів та питомих характеристик отриманих циклів виконано з залученням (рів.14 – 21). Результати наведено в таблиці 6.

Таблиця 6. Результати термодинамічного аналізу впливу p_{20} на COP циклу.

№ пп	Найменування характеристик циклу	Тиск в газовому охолоджувачі, МПа		
		10,0	9,0	8,0
1	Питома масова витрата через КВС, кг/с	1,41	1,42	1,475
2	Питома адіабатна робота компресора КВС, кДж/кг	130	119	126
3	Питома дійсна робота циклу, кДж/кг	357	310	318
4	Питома холодопродуктивність циклу зрідження, кДж/кг	343	343	343
5	Ефективність циклу, COP	0,96	1,12	1,08



Розрахунки свідчать, що високу ефективність має цикл з тиском 0,9МПа в газовому охолоджувачі за незмінним корисним ефектом зрідження CO₂. Отримані результати є достовірними, підтверджені даними роботи [15].

2.3. Тепловий та конструктивний розрахунок повітряного газового охолоджувача [16,17]

Теплообмінні апарати для CO₂ виготовляють з мідних або сталевих труб з пластинчастими ребрами. Теплообмінники оснащені більш товстими трубками. В проекті використовуються теплообмінники газ-газ, фірми Master GasSeoul(Південна Корея), які призначено для роботи з високими тисками та температурами (рис.8), з відповідними конструктивними змінами для роботи у складі установки для виробництва зрідженого CO₂.



Рис.14. Теплообмінник “газ-газ” фірми MasterGasSeoul[18]

Для розрахунку довільно приймаємо теплове навантаження на газовий охолоджувач $Q_{zo}=100$ кВт. Довільний вибір має метою розробити методику теплового та конструктивного розрахунку високотемпературного теплообмінника з CO₂ робочою речовиною та повітрям у якості охолоджуючого середовища.

Теплове навантаження $Q_{zo} = 100$ кВт;

Температура CO₂ на вході в охолоджувач $T_2 = 125^\circ\text{C}$;

Температура CO₂ на виході з охолоджувача $T_3 = 30^\circ\text{C}$;

Температура повітря на вході в охолоджувач $T_{cp} = 25^\circ\text{C}$;

Геометрія теплообмінної поверхні:

$d_3 = 14$ мм – зовнішній діаметр труби;

$d_{\text{вн}} = 10$ мм – внутрішній діаметр труби;

$\delta_{\text{тр}} = 2$ мм – товщина стінки труби;

Форма ребра – пластина;

$\delta_p = 0,4$ мм – товщина ребра;

$u_p = 2,5$ мм – крок між ребрами;

Розташування труб – шахматне;

Крок між трубами в фронтальній площині $S_1 = 44$ мм;

Крок між трубами за рухом повітря $S_2 = 44$ мм.

Теплофізичні властивості CO₂ та повітря [19]

Таблиця 3. Теплофізичні властивості CO₂

Теплофізичні характеристики	Одиниці виміру	T = 30°C	T = 125°C
Тиск	МПа	9,0	9,0
Питома теплоємність	кДж/кгК	7829	1516
Теплопровідність	Вт/мК	0,0655	0,035
Кінематична в'язкість	м ² /с	$0,073 \cdot 10^{-6}$	$0,119 \cdot 10^{-6}$
Густина	кг/м ³	613	184,5
Критерій Прандтля		5,23	1,0

Таблиця 4. Теплофізичні властивості повітря

Теплофізичні характеристики	Одиниці виміру	T = 25°C
Тиск	МПа	0,1
Питома теплоємність	кДж/кг.К	1,009
Теплопровідність	Вт/м.К	0,0296
Кінематична в'язкість	Па/с	20,6*10 ⁻⁶
Густина	кг/м ³	1,123
Критерій Прандтля		0,694

Середній температурний напір в апараті

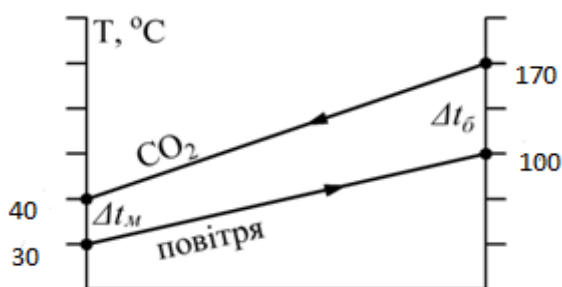


Рис.15. Температурний напір в газівому охолоджувачі

Приймаємо підігрівання повітря на 70 градусів

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \theta_1 / \theta_2} = \frac{35 - 5}{\ln 35 / 5} = 15.54 \text{ .град} \quad (2.27)$$

Теплообмінні поверхні ребреної труби

Розрахункові поверхні апарату на 1 погонному метрі ребреної труби:

Внутрішня теплообмінна поверхня

$$f_{\text{вн}} = \pi d_{\text{вн}} = 3.14 \cdot 0.01 = 0.0314 \text{ м}^2 \quad (2.28)$$

Поверхня міжреберних ділянок

$$f_{\text{мр}} = \pi d_3 (1 - \delta_p / u_p) = \pi 0.014 (1 - \frac{0.0004}{0.0025}) = 0,0369 \text{ м}^2 \quad (2.29)$$

Поверхня ребер

$$f_p = 2(H^2 - \pi d_s^2 / 4) \frac{1}{u_p} = 2(0.044^2 - \pi 0.014^2 / 4) \frac{1}{0.0025} = 1.425 \text{ м}^2 \quad (2.30)$$

Зовнішня теплообмінна поверхня

$$f_{pe} = f_{mp} + f_p = 1,425 + 0,0369 = 1,462 \text{ м}^2 \quad (2.31)$$

Площа живого перетину труби

$$F_{жс} = \pi d_{вн}^2 / 4 = \pi \cdot 0.01^2 / 4 = 7.85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (2.32)$$

Коефіцієнт тепловіддавання транскритичного CO₂, що рухається в трубі

Масова витрата CO₂

$$M_{co2} = Q_{co} / q_{uj} = 100 / 410 = 0.244 \text{ кг/с} \quad (2.33)$$

Об'ємна витрата CO₂

$$V_{co2} = M_{co2} / \rho = 0.244 / 399 = 0.0006 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.34)$$

Швидкість руху потоку CO₂

$$w_{co2} = V_{co2} / F_{жс} = 0,0006 / 7,85 \cdot 10^{-5} = 7,64, \text{ м/с} \quad (2.35)$$

Критерій Рейнольдса

$$Re = w_{co2} d_{вн} / \nu_{co2} = 7,64 \cdot 0,01 / 0,096 \cdot 10^{-6} = 796000 \quad (2.36)$$

Критерій Нусельта

$$Nu_{co2} = 0.018(7.96 \cdot 10^5)^{0.8} = 946 \quad (2.37)$$

Коефіцієнт тепловіддавання CO₂

$$\alpha_{co2} = Nu_{co2} \lambda_{co2} / d_{вн} = 946 \cdot 0,05 / 0,01 = 4825, \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (2.38)$$

Коефіцієнт тепловіддавання повітря, що рухається крізь пучок оребрених труб

Масова витрата повітря

$$M_{пов} = Q_{co} / c_{пов} \Delta t_{пов} = 100 / 1,009 \cdot 65 = 1,52, \text{ кг/с} \quad (2.39)$$

Об'ємна витрата повітря

$$V_{нов} = M_{нов} / \rho_{нов} = 1,52 \cdot / 1,123 = 1,35, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.40)$$

Площа живого перетину для руху повітря, за умови швидкості потоку

$$w = 5 \text{ м/с}$$

$$F_{жнов} = V_{нов} / w_{нов} = 1,35 / 5 = 0,27, \text{ м}^2 \quad (2.41)$$

Конвективний коефіцієнт тепловіддавання від повітря визначено за рівнянням Іюффе для пластинчастих ребер з шаховим розташуванням труб[17].

Розрахунковий еквівалентний діаметр

$$d_э = \frac{2 \cdot (S_1 - d_n) \cdot (u_p - \delta_p)}{(S_1 - d_n) + (u_p - \delta_p)} = \frac{2 \cdot (44 \cdot 10^{-3} - 14 \cdot 10^{-3}) \cdot (2,5 \cdot 10^{-3} - 0,4 \cdot 10^{-3})}{(44 \cdot 10^{-3} - 14 \cdot 10^{-3}) + (2,5 \cdot 10^{-3} - 0,4 \cdot 10^{-3})} = 0,00391 \text{ м} \quad (2.42)$$

Коефіцієнт оребрення

$$\beta = \frac{f_{pe}}{f_{вн}} = \frac{1,462}{0,0314} = 46,5 \quad (2.43)$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = w_{co2} d_{вн} / \nu_{co2} = 5,0 \cdot 0,00393 / 20,6 \cdot 10^{-6} = 953,9 \quad (2.44)$$

Критерій Нусельта:

$$Nu_{нов} = 0,21 Re_{нов}^{0,6} (l / d_e)^{-0,14} = 0,21 \cdot 953,9^{0,6} (0,044 / 0,00393)^{-0,14} = 9,18 \quad (2.45)$$

Визначальний розмір:

$$l = S_1 = 44 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.46)$$

Конвективний коефіцієнт тепловіддавання, віднесений до зовнішньої поверхні ребер

$$\alpha_{нов} = \frac{Nu_{нов} \cdot \lambda_{нов}}{d_e} = \frac{9,18 \cdot 0,0296}{3,91 \cdot 10^{-3}} = 69,5, \text{ с/м}^2\text{К} \quad (2.47)$$

Коефіцієнт ефективності ребра:

$$\rho_1 = 1,15 \cdot \frac{S_1}{d_n} = 1,15 \cdot \frac{44 \cdot 10^{-3}}{14 \cdot 10^{-3}} = 3,61 \quad (2.48)$$

$$h' = \frac{d_n}{2} \cdot (\rho_1 - 1) \cdot (1 + 0,805 \cdot \log(\rho_1)); \quad (2.49)$$

$$h' = \frac{14 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (3,61 - 1) \cdot (1 + 0,805 \cdot \log(3,61)) = 0,0109 \text{ м} \quad (2.50)$$

Для алюмінію: $\lambda = 241 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{пов}}}{\lambda_p \delta_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 67,8}{241 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}} = 37,5 \text{ м}^{-1} \quad (2.51)$$

$$E = \frac{\tanh(mh')}{(mh')} = \frac{\tanh(37,5 \cdot 0,0109)}{(37,5 \cdot 0,0109)} = 0,9 \quad (2.52)$$

Коефіцієнт тепловіддавання, віднесений до внутрішньої поверхні:

$$\alpha_{\text{пов}} = \alpha_{\text{пов}} \left(\frac{f_p}{f_{\text{вн}}} E + \frac{f_{\text{мп}}}{f_{\text{вн}}} \right) = 69,5 \left(\frac{1,425}{0,0314} \cdot 0,9 + \frac{0,0369}{0,0314} \right) = 2917, \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (2.53)$$

Коефіцієнт теплопередавання в газовому охолоджувачі, віднесений до внутрішньої поверхні

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{2917} + \frac{1}{4825} + \frac{0,002}{394} \right)^{-1} = 1818, \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (2.54)$$

Повна внутрішня теплопередавальна поверхня охолоджувача

$$F_{\text{вн}} = Q_{\text{зо}} / k_{\text{вн}} \theta_m = 100 \cdot 10^3 / 1818 \cdot 15,54 = 3,53, \text{ м}^2 \quad (2.55)$$

Конструктивний розрахунок газового охолоджувача

Загальна довжина труби в газовому охолоджувачі

$$L_3 = \frac{F_{\text{вн}}}{\pi d_{\text{вн}}} = \frac{3,53}{3,14 \cdot 0,01} = 112, \text{ м} \quad (2.56)$$

Живий перетин охолоджувача за рухом повітря, віднесений до 1 орбреного елемента.

$$f_{\text{жп}} = (S_1 - d_{\text{нар}})(u_p - \delta_p) = (44 - 14) \cdot (2,5 - 0,4) \cdot 10^{-6} = 63 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2 \quad (2.57)$$

Кількість орбренных елементів у живому перетині апарату

$$n_{\text{жпов}} = F_{\text{жпов}} / f_{\text{жп}} = 0,27 / 63 \cdot 10^{-6} = 4285 \quad (2.58)$$

Кількість орбренных елементів на 1 погонному метрі труби

$$n_{\text{жпоє1.м}} = 1/u_p = 1/0,025 = 400 \quad (2.59)$$

Загальна довжина труби у фронтальній площині охолоджувача

$$L_{\text{фр}} = n_{\text{жпоє}} / n_{\text{жпоє1.м}} = 4285 / 400 = 10,7, \text{ м} \quad (2.60)$$

Приймаємо довжину однієї труби у фронтальній площині $l_{\text{1тр}} = 650 \text{ мм}$.

Кількість труб в живому перерізі

$$n_{\text{фр}} = L_{\text{фр}} / l_{\text{1тр}} = 10,7 / 0,65 = 16, \quad (2.61)$$

Кількість секцій за рухом повітря

$$n_{\text{сек}} = L_3 / l_{\text{1тр}} = 112 / 10,7 = 10, \quad (2.62)$$

Габаритні розміри газового охолоджувача— $A \times B \times C = 650 \times 700 \times 450$, мм

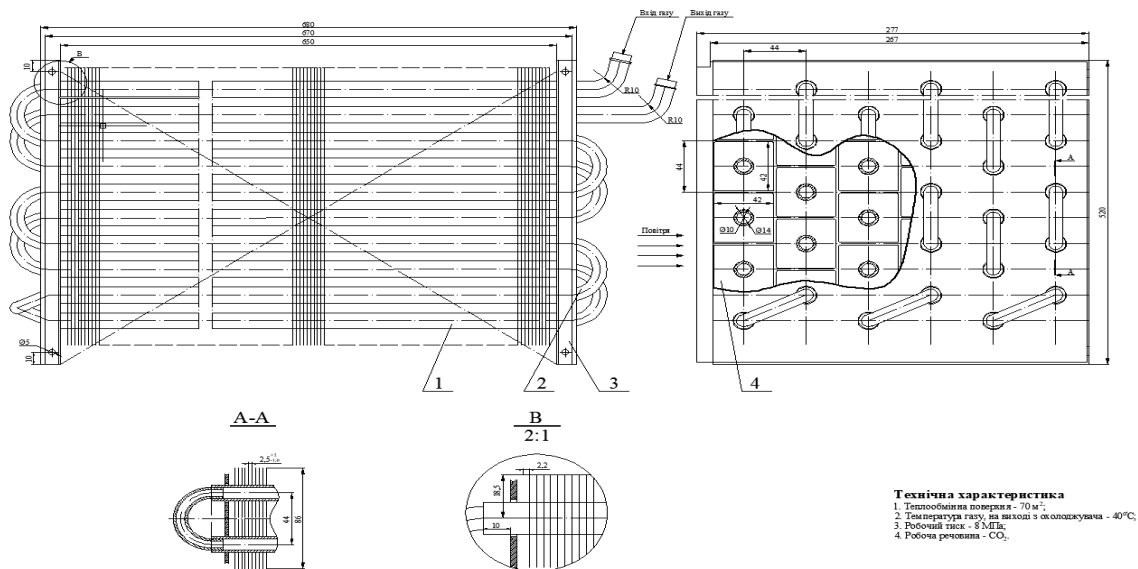


Рис.16. Ескіз конструкції газового охолоджувача

Аеродинамічний розрахунок охолоджувача

Аеродинамічний опір оребреного пучка труб потоку повітря

$$\Delta p = A \left(\frac{L}{d_{\text{екв}}} \right) (\omega \rho)^{1,7} \quad (2.63)$$

де A — постійний коефіцієнт для ретельного виконання поверхні

$$A = 0.0113;$$

$d_e = 0.0039 \text{ м}$, L - глибина апарату за рухом повітря

$$\Delta p = A(L/d_e)(\omega \rho)^{1,7} = 0.0113 \cdot (0.45 / 0.00393) \cdot (5 \cdot 1.123)^{1,7} = 24.33. \text{ мм. вод. ст}$$

2.4 .Визначення ємності резервуару для зберігання зрідженого CO₂.

Резервуари для зберігання рідкого (CO₂) типу РДХ 5,0-2,0; 10,0-2,0; 12,5-2,0; 22,5-2,0; 30,0-2,0; 40,0-2,0; 50,0-2,0 призначені для тривалого низькотемпературного зберігання зрідженого CO₂ без обмеження терміну, що відповідає вимогам ГОСТ 8050-85 РФ. Резервуари забезпечують

тривале зберігання з середньодобовим підйомом тиску 0,06 ... 0,08 МПа при середньодобовій температурі навколишнього середовища 30°C без втрат продукту; заправку, дозаправку і видачу зрідженого і газоподібного CO₂ споживачам ;



Рис.17.Загальний вигляд резервуару

Внутрішній посуд, виготовлений з низьколегованої сталі 09Г2С; закріплено всередині зовнішнього кожуха резервуару, виготовленого з нержавіючої сталі . Ємність об'язано трубопроводами так, щоб забезпечити компенсацію відносних температурних переміщень елементів конструкції.

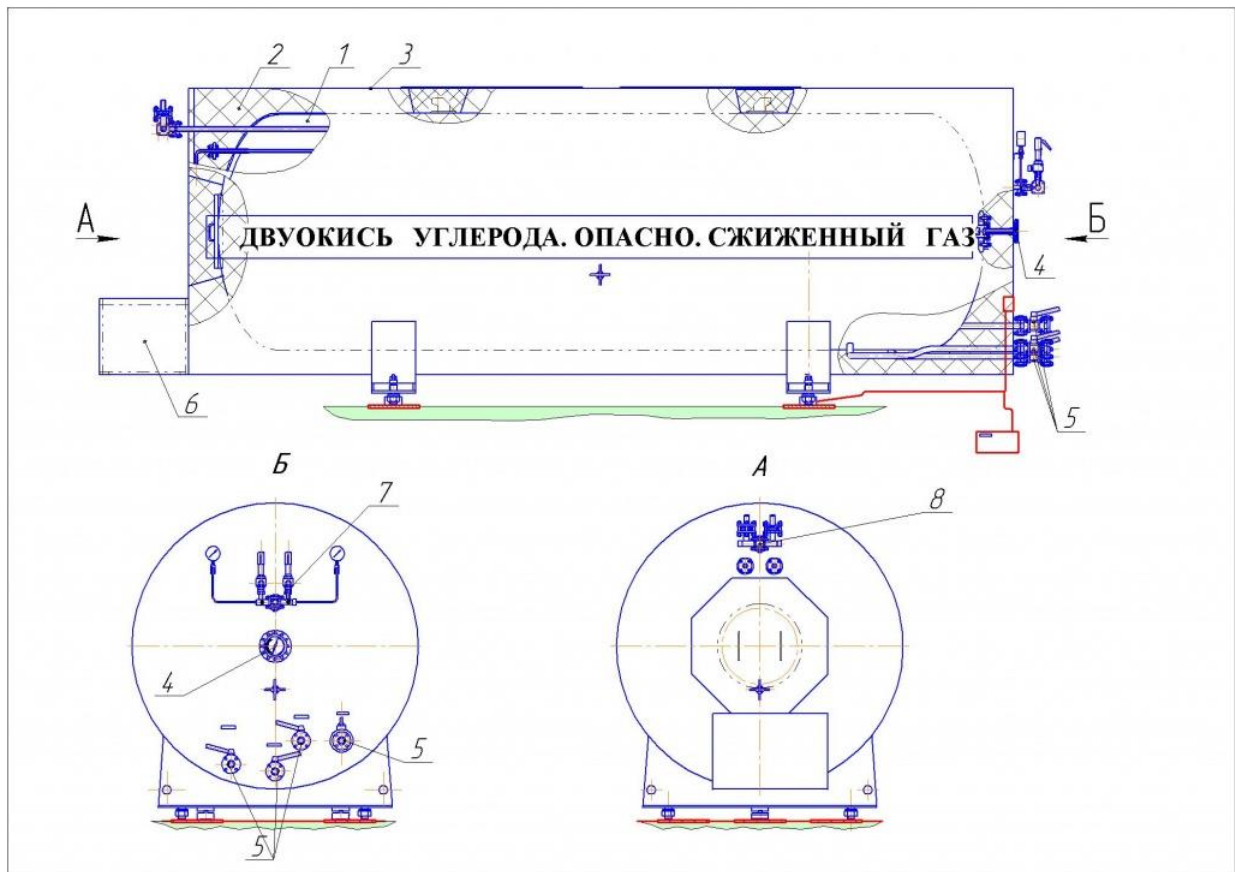


Рис.18. Резервуар для тривалого зберігання зрідженого CO₂[18]:

1- внутрішній посуд, 2- теплоізоляція, 3- кожух резервуара, 4- індикатор магнітний поплавковий для вимірювання рівня, об'єму і маси CO₂; 5- кульові крани для наповнення і видачі продукту, 6- холодильна система підтримки тиску в резервуарі, 7- станція для роботи з спожи

Простір між внутрішнім посудом і кожухом заповнюється жорстким поліуретаном сист. 3017 / Н-2;

На корпусі є приварні елементи для стропування апарату при його переміщеннях, транспортуванні, а також кріпильні пластини для установки продукційного випарника. На сталевому кожусі встановлено запобіжний пристрій для запобігання від надлишкового тиску всередині зовнішньої оболонки в разі витоку газу з внутрішньої ємності або трубок. На днищах розміщені прилади виміру рівня і тиску рідини, вся арматура управління і захисту газифікатора. Над приладами виконаний захисний козирок при установці резервуару на відкритому майданчику. На корпусі виведені також вентиля призначені для вакуумування порожнини і контролю вакууму.

Для зберігання рідкого двоокису вуглецю в резервуарі під певним тиском і без втрат, резервуар повинен бути оснащений холодильним агрегатом. Холодильний агрегат змонтований і встановлений на рамі з торцевої частини резервуара. Випарник холодильної машини розташовано у внутрішньому сосуді резервуара. Холодильний агрегат працює в автоматичному режимі і не вимагає участі оператора.

Таблиця 6. Технічні характеристики резервуару.

Тип	РДХ 5,0-2,0	РДХ 10,0-2	РДХ 12,5-2	РДХ 22,5-2	РДХ 30-2,0
Номінальний об'єм, м ³	5,0	10,0	12,0	22,5	30,0
Максимальний робочий тиск, МПа	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Максимальна температура рідкого CO ₂ , °C	-18	-18		-18	-18
Мінімальна температура рідкого CO ₂ , °C	-43	-43	-43	-43	-43
Маса рідкого CO ₂ , кг,	4925	9825	12260	22100	29470

Час заповнення резервуару τ визначається згідно з залежністю.

$$\tau = \frac{0,8V_{\text{рез}}\rho_{\text{рід}}}{Gx_2}. \quad (2.64)$$

За відсутністю наявності продуктивності головного технологічного процесу, час заповнення ємності резервуару наведено в графічній формі в залежності від зміни масової витрати CO₂ в холодильній машині (рис.19).

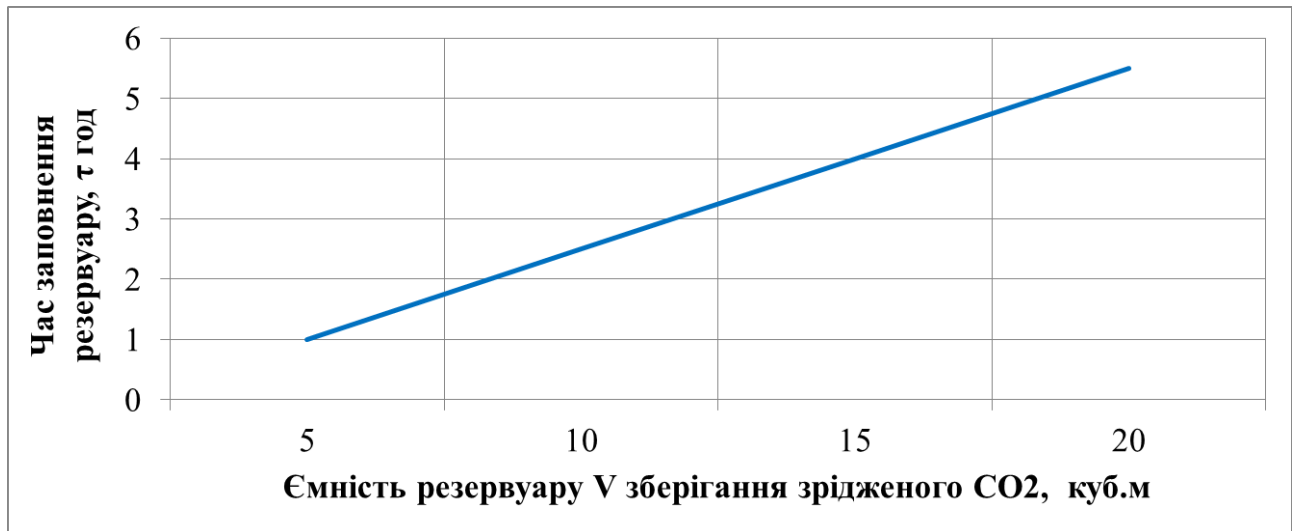


Рис.19.Час заповнення резервуара в залежності від масової витрати CO₂ в холодильній машині.

Конструкційна безпека резервуару зберігання зрідженого CO₂

-ретельною розробкою проекту, який виконано з урахуванням нормативних документів з розробки даного типу судин;

- урахуванням всіх видів навантажень, таких як тиск, вага;

- вплив криогенних температур, різниця температур різних елементів;

- вибором матеріалів і комплектуючих виробів, які забезпечують роботу конструкції при заданих умовах навантаження;

-контролем якості матеріалів і виробів на всіх етапах виготовлення; [14]

-забезпечення конструкції запобіжними пристроями.

Ємність для вуглекислоти забезпечена такими запобіжними пристроями;

- системою захисту внутрішньої судини від перевищення тиску;

-пристроєм захисту зовнішнього корпусу від тиску в теплоізоляційній порожнині;

-пристроєм захисту від перевищення тиску.

2.5. Вибір компресорів для холодильної машини.

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 CO_2 . Такі позитивні властивості CO_2 , 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:

- малі відцентрові компресори(рис.20);
- гвинтові сухі компресори(рис.21);
- мембранні компресори (рис.22);
- поршневі крейцкопфні компресори(рис.23).

2.4.1. Компресор відцентровий

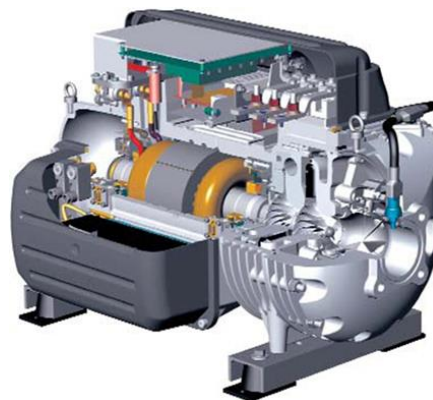


Рис.20. Відцентровий компресор [20]

Двоступеневий герметичний компресор потужністю до 100 кВт на CO_2 випускається в компактному виконанні, електродвигун знаходиться в центрі

корпусу компресора. Зовнішній діаметр колеса менше 80 мм, загальна довжина двох ступенів менше 90 мм. Використано газові підшипники (пелюсткові газодинамічні), так що олива для їх змащення не потрібна, вони охолоджуються потоком CO₂.

Компресор спроектовано на тиск всмоктування 3,0 МПа і максимальний ступінь стиснення. Продуктивність компресора регулюється зміною частоти обертання валу (від 40950 до 50000 об / хв). Очікуваний загальний ККД компресора в розрахунковій точці становить близько 60%.

2.4.2. Сухий гвинтовий компресор

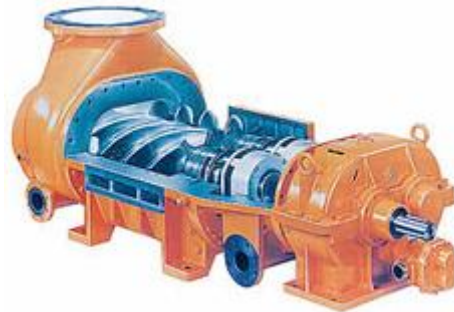


Рис.21. Сухий гвинтовий компресор[21]

Ведучий ротор і ведений розташовані в корпусі, який може мати водяне або повітряне охолодження. Для запобігання зовнішніх витоків застосовуються кінцеві ущільнення. Ротори компресора є його основними робочими органами, в гвинтовій частині яких здійснюється стиснення газу. Ведучий ротор має опуклі зуби, а ведений - увігнуті.

Привід компресора здійснюється як правило через провідний ротор. На торцях гвинтовий частини роторів, а також на зовнішньому діаметрі передбачені ущільнювальні вусики, профрезерований вузькі канавки. Ротори компресорів сухого стиснення зазвичай виконуються порожніми, вони не охолоджуються. Важливе значення має вибір зазорів як між роторами компресора, так і між роторами і корпусом. Зазор між робочими органами компресора сухого стиснення зазвичай становить приблизно 0,1% зовнішнього діаметра роторів.

Переваги гвинтових компресорів сухого стиснення перед іншими типами компресорних машин такі: невеликі маса і розміри; надійність в роботі і довговічність через відсутність труття; об'ємне е стиснення, що виключає помпаж при будь-яких режимах роботи; можливість роботи на легких фундаментах і в транспортних установках завдяки повній врівноваженості компресора; простота обслуговування; рівномірність подачі газу споживачеві, що дозволяє відмовитися від газосборників; можливість стиснення газу без забруднення його продуктами мастила.

Короткий перелік стискаються газів, що стискають: повітря | азот | Аргон | ксенон | криптон | Біо-газ | Вуглекислий газ | Чадний газгелій | Гелій-3 | Киснево-гелієва суміш (Геліокс)водень | Хлористий водень (хлороводень) | фтористий воденьметан | пропан | Природний газкисень

2.4.3.Мембранний компресор



Рис.22. Двоступеневий мембранний компресор Ковинт КСВД-М [22]

Мембранні компресори призначені для стиснення різних сухих газів, крім кисню, без забруднення їх оливою і продуктами зносу тертя частин. Можуть використовуватися в виробництвах і наукових дослідженнях, де до чистоти газу, що стискається, і герметичності компресора висуваються жорсткі вимоги. Компресори, що рекомендуються, мають об'ємну продуктивність від 20 до 80 м³/год з робочими тисками на всмоктуванні від 0,02 МПа до 40 МПа на

нагнітання. Компресори автоматизовані, не вимагають постійної присутності обслуговуючого персоналу. Дані про роботу компресора можна вивести на комп'ютер, що дозволяє стежити за нею в режимі реального часу

Поршневі крейцкопфні компресори



Рис.23. Крейцкопфний компресор на CO₂ [23]

Американська компанія RIX Industries виробляє на своїх заводах в рр. Бениша, Каліфорнія і Спаркс, Невада широкий спектр промислових поршневих безмасляних компресорних установок для стиснення технічних газів - кисню, водню, азоту, вуглекислого газу, гелію, різних вуглеводнів та інших, в тому числі небезпечних і рідкісних, газів, а також їх сумішей.

Компресори для стиснення технічних газів серії 4VX - це високоякісні, надійні, економічні і безпечні крейцкопфні поршневі компресорні установки безмасляного стиснення, призначені як для стиснення газів «з нуля», тобто, починаючи з атмосферного тиску, так і для підвищення вже наявного надлишкового тиску газу .

В основі установок серії 4VX - пристосовані для тривалої безперервної роботи блоки стиснення з циліндрами, що складаються з алюмінієвого корпусу з ребрами повітряного охолодження, і встановленого в ньому вкладиша з високоміцної нержавіючої сталі. Опціонально, можливе виготовлення

компресора з циліндрами з водяним охолодженням, повністю виконаними зі сталі, з легко замінними вкладишами з нержавіючої сталі. Низькі компресійні числа, в поєднанні з виготовленими з запасом міжступенчатом проміжними теплообмінниками, гарантують постійну низьку температуру циліндрів, а низька швидкість рухомих частин зводить до мінімуму їх знос (швидкість обертання від 300 до 1100 хв-1). Хід поршнів складає 4 дюйма.

Стандартна комплектація компресорів серії 4VX включає в себе:

- приводний електродвигун з системою клиноремінного приводу в кожусі огорожі,
- фінальний і проміжні (у багатоступеневих компресорів) теплообмінники,
- окремий вентилятор охолодження TENV з напрямних потік кожухом,
- розвантажувальні клапани по числу ступенів стиснення,
- запобіжні клапани по числу ступенів стиснення,
- манометри.

ВИСНОВКИ

1. Вуглекислотна установка призначена для виробництва трьох видів продукції: зрідженого CO₂, що зберігається в газових балонах високого тиску (5,0 МПа) при температурі навколишнього середовища, зрідженого CO₂, що зберігається в балонах-термосах, резервуарах-сховищах з низькою температурою (-45°C та -20°C) і сухого льоду (-78°C). Установка може бути частиною спеціалізованого вуглекислотного цеху, в якому виробляють CO₂ газ, або частиною підприємства з технологічним процесом, в якому CO₂ газ є побічним продуктом.

2. 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-вимірвальними приладами і приладами регулювання і управління.

3. 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.

4. Залежно від призначення установки підбирається комплект обладнання..

5. Оскільки критична температура CO₂ - 31°C, то температура охолоджуючого середовища є головним критерієм для вибору типу (циклу) машини. Якщо її температура не перевищує + 25 ° C (йдеться про воду у якості охолоджуючого середовища), то вибирається машина високого тиску з конденсатором. Якщо температура охолоджуючого середовища (води або повітря) вища за + 25 ° C, то використовують каскадну машину або транскритичний цикл високого тиску. Вуглекислотна машина є одним з типів вказаних холодильних машин. Кожна з цих машин має свої особливості.

6. Машина високого тиску відрізняється простотою, особливо при виробництві тільки зрідженого газу, При цьому в машині високого тиску витрачається приблизно на 9% менше електроенергії, ніж в каскадній машині. При виробництві сухого льоду навпаки, витрата електроенергії в машині високого тиску більше і різниця доходить до 16%.

7. Машина високого тиску з конденсацією може бути одно- або двоступеневою. Блоки сухого льоду в цьому випадку наморожують в льодогенераторах. Якщо машину призначено тільки для зрідження CO₂ газу, то для цього можна використовувати повітряні компресори високого тиску (до 10,0МПа) 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 за триступеневою схемою. Зазвичай це машини великої продуктивності.

8. Крапельна волога з робочої речовини, а також крапельна олива з циліндрів компресора відокремлюються в оливовологовідділювачі. Очищення CO₂ від парів оливи здійснюється в фільтрах з активованим вугіллям, а осушення - в фільтрах з силікагелем, який забезпечує осушення до точки роси -62°C. На регенерацію фільтрів витрачається до 8% електроенергії. Балони наповнюються зрідженим газом за вагою під тиском, створюваним компресором.

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 замааслену 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 небезпеки. 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.

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.