

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



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему: Дослідження та розробка холодильної системи для  
підприємств торгівлі на природних робочих тілах

Здобувача Пустовіт М.О.

2 курсу ХМ-161МН групи

Керівники д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г.

к.т.н., доц. Яковлева О.Ю.

Консультанти: д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г.

д.е.н, проф. Басюркіна Н.Й.

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 31.05.2024 р. протокол № 12

Завідувач кафедри ХУКП Михайло ХМЕЛЬНЮК

Одеса - 2024 рік

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

|                      |                                                        |
|----------------------|--------------------------------------------------------|
| Факультет            | Низькотемпературної техніки та інженерної механіки     |
| Кафедра              | Холодильних установок і кондиціонування повітря        |
| Ступінь вищої освіти | Магістр                                                |
| Спеціальність        | 142 Енергетичне машинобудування                        |
| Освітня програма     | Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря |

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г.

«20» листопада 2023 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Пустовіт Михайло Олегович

1. Тема роботи Дослідження та розробка холодильної системи для підприємств торгівлі на природних робочих тілах

Затверджена наказом ОНТУ від 31.10.2022 р. наказ № 784-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 31.05.2024 р.

3. Вихідні дані роботи

Супермаркет працює на двох температурних рівнях - низькотемпературному (НТ, розрахункова температура кипіння -35°C) і середнетемпературному (СТ, розрахункова температура кипіння -10°C). Система холодопостачання супермакету двохступінчаста холодильна установка, яка працює на CO<sub>2</sub> та каскадна з R134 у ВК. Температура навколишнього середовища - плюс 32°C; Охолодження середньотемпературного контуру - 360 кВт, низькотемпературного контуру - 70 кВт.

4. Перелік питань, які потрібно розробити

Реферат, Розділ 1. Теоретична частина, Розділ 2. Розрахункова частина, Розділ 3. Аналітична частина, Розділ 4. Охорона праці, Розділ 5. Економічна частина, Висновки, Список використаної літератури.

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

1. Презентація в PowerPoint

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

| Розділ             | Консультант                 | Підпис, дата   |                  |
|--------------------|-----------------------------|----------------|------------------|
|                    |                             | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Економічна частина | д.е.н, проф. Басюркіна Н.Й. | 20.05.2024     | 24.05.2024       |
| Охорона праці      | д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г. | 10.05.2024     | 17.05.2024       |

7. Дата видачі завдання 20.11.2023 р.

Керівники Хмельнюк М.Г.

Яковлева О.Ю.

Завдання прийняв до виконання Пустовіт М.О.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №  | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                           | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1  | Реферат                                                                       | 27.05-28.05.2024               | виконано |
| 2  | Розділ 1. Теоретична частина                                                  | 20.11-25.12.2023               | виконано |
| 3  | Розділ 2. Розрахункова частина                                                | 06.01-20.02.2024               | виконано |
| 4  | Розділ 3. Аналітична частина                                                  | 20.02-23.03.2024               | виконано |
| 5  | Розділ 4. Охорона праці                                                       | 10.05-17.05.2024               | виконано |
| 6  | Розділ 5. Економічна частина                                                  | 20.05-24.05.2024               | виконано |
| 7  | Висновки                                                                      | 25.05-26.05.2024               | виконано |
| 8  | Список використаної літератури                                                | 27.05-28.05.2024               | виконано |
| 9  | Підготовка презентації та доповіді                                            | 25.05-30.05.2024               | виконано |
| 10 | Відгук керівників, рецензування, підготовка до захисту кваліфікаційної роботи | 30.05-31.05.2024               | виконано |

Здобувач-дипломник Пустовіт М.О.

Керівники роботи Хмельнюк М.Г.

Яковлева О.Ю.

*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 доброчесності.*

Здобувач-дипломник Пустовіт Михайло Олегович

## Реферат

Кваліфікаційна робота складається з: 112 сторінок тексту, 44 рисунків, 22 таблиць, 20 посилань на літературні джерела. В даній кваліфікаційній роботі проведено дослідження та розробка холодильної системи для підприємств торгівлі на природних робочих тілах.

Застосування традиційних холодоагентів обмежується різними нормативами, причому в усьому світі спостерігається тенденція до їхньої жорсткості. Унаслідок цього останнім часом усе частіше рекомендується використовувати альтернативні холодоагенти. У зв'язку із заходами, що застосовуються світовим співтовариством для скорочення виробництва та споживання озоноруйнівних речовин і парникових газів, все більшого значення набувають природні холодоагенти: повітря, вода, вуглеводні, двоокис вуглецю та аміак.

В даній роботі було розраховано та проаналізовано схемні рішення систем холодопостачання супермаркету на двох температурних рівнях з використанням діоксиду вуглецю. Проведено аналіз застосованих сучасних заходів з підвищення енергоефективності транскритичних систем, таких як паралельне стискування та ежектор.

**Ключові слова:** підприємства торгівлі – CO<sub>2</sub> – R134a – ежектор.

## Abstract

The qualification work consists of: 112 pages of text, 44 figures, 22 tables, 20 references to literary sources. In this qualification work, the research and development of a refrigeration system for trade enterprises on natural working bodies was carried out.

The use of traditional refrigerants is limited by various standards, with a worldwide trend towards their rigidity. As a result, alternative refrigerants have been increasingly recommended in recent times. Natural refrigerants, such as air, water, hydrocarbons, carbon dioxide, and ammonia, are becoming increasingly important in response to measures taken by the world community to reduce the production and consumption of ozone depleting substances and greenhouse gases.

In this paper, circuit diagrams of supermarket refrigeration systems at two temperature levels using carbon dioxide were calculated and analyzed. The analysis of applied modern measures to improve the energy efficiency of transcritical systems, such as parallel compression and ejector, is carried out.

**Keywords:** trade enterprises – CO<sub>2</sub> – R134a – ejector.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 4    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

# ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                                           | стор. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| РЕФЕРАТ.....                                                                                                                                                                              | 4     |
| ВСТУП.....                                                                                                                                                                                | 6     |
| РОЗДІЛ I. Теоретична частина.....                                                                                                                                                         | 7     |
| 1.1 Актуальність теми .....                                                                                                                                                               | 7     |
| 1.2 Огляд робочих тіл і схем холодильних систем. ....                                                                                                                                     | 11    |
| 1.3 Застосування CO <sub>2</sub> в каскадних системах.....                                                                                                                                | 22    |
| 1.4 Аналіз останніх досліджень і публікацій.....                                                                                                                                          | 31    |
| 1.5 Застосування CO <sub>2</sub> як холодоагенту в холодильних системах супермаркетів.....                                                                                                | 40    |
| 1.6 Приклади комерційних холодильних систем на CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                      | 43    |
| 1.7 Підвищення ефективності холодильної системи в магазинобудування .....                                                                                                                 | 48    |
| РОЗДІЛ II Розрахункова частина .....                                                                                                                                                      | 55    |
| 2.1 Вихідні дані для розрахунку системи на CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                          | 55    |
| 2.2 Результати розрахунку холодильної системи з CO <sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклі.....                                                           | 58    |
| 2.3. Результати розрахунку холодильної системи з CO <sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклі з паралельним стисненням .....                                | 64    |
| 2.4. Результати аналізу холодильної системи з CO <sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклу з паралельним стисненням і ежектором.....                        | 67    |
| 2.5. Результати аналізу каскадної холодильної системи з CO <sub>2</sub> , що працює по субкритичного циклу (нижня гілка каскаду) для НТ і R134a (верхня гілка каскаду) СТ споживачів..... | 71    |
| РОЗДІЛ III. Аналітична частина .....                                                                                                                                                      | 76    |
| 3.1 Оцінка енергоефективності систем на CO <sub>2</sub> для супермаркетів.....                                                                                                            | 76    |
| 3.2 Результати аналізу холодильних систем.....                                                                                                                                            | 54    |
| РОЗДІЛ IV. Охорона праці .....                                                                                                                                                            | 87    |
| РОЗДІЛ V. Економічна частина.....                                                                                                                                                         | 103   |
| Висновки .....                                                                                                                                                                            | 110   |
| Список використаної літератури.....                                                                                                                                                       | 111   |

|           |      |               |        |      |                                                                                                 |                   |       |         |
|-----------|------|---------------|--------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|---------|
|           |      |               |        |      | КРМ.ХУКП.1.784-03.1.5                                                                           |                   |       |         |
| Зм.       | Арк. | № докум.      | Підпис | Дата |                                                                                                 |                   |       |         |
| Розроб.   |      | Пустовіт М.О. |        |      | Дослідження та розробка холодильної системи для підприємств торгівлі на природних робочих тілах | Літ.              | Аркуш | Аркушів |
| Перевір.  |      | Яковлева О.Ю. |        |      |                                                                                                 |                   | 5     | 112     |
| Реценз.   |      |               |        |      |                                                                                                 | ОНТУ гр. ХМ-161МН |       |         |
| Н. Контр. |      | Хмельнюк М.Г. |        |      |                                                                                                 |                   |       |         |
|           |      |               |        |      |                                                                                                 |                   |       |         |

## ВСТУП

Питання охорони навколишнього середовища та безпеки роботи холодильних установок є одними з найбільш актуальних під час проектування холодильного обладнання та вибору холодоагенту. Застосування традиційних холодоагентів обмежується різними нормативами, причому в усьому світі спостерігається тенденція до їхньої жорсткості. Унаслідок цього останнім часом усе частіше рекомендується використовувати альтернативні холодоагенти. У зв'язку із заходами, що застосовуються світовим співтовариством для скорочення виробництва та споживання озоноруйнівних речовин і парникових газів, все більшого значення набувають природні холодоагенти: повітря, вода, вуглеводні, двоокис вуглецю та аміак.

За останні роки важливість CO<sub>2</sub> як холодоагенту в секторі холодильного обладнання для продовольчої торгівлі помітно зросла. Найважливіше при цьому те, що CO<sub>2</sub> – один з небагатьох холодоагентів для холодильних систем, які перспективні із погляду безпеки та нешкідливості для навколишнього середовища. CO<sub>2</sub> може використовуватися як холодоагент у холодильних системах різних типів, що працюють як у докритичних (субкритичних), так і надкритичних (транскритичних) циклах. Ефективне використання матеріальних енергетичних ресурсів на промислових підприємствах стає все більш актуальним для України, оскільки енергоємність українського промислового виробництва та сфери соціальних послуг в 2-3 рази більші за світові показники.

Більшість промислових підприємств в Україні використовують енергію неефективно, оскільки стара система не приділяла належну увагу енергозбереженню чи хоча би обліку затрат на енергозбереження.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 6    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

## **РОЗДІЛ I. Теоретична частина**

### **1.1 Актуальність теми.**

На сьогоднішній день тема енергозбереження дуже важлива по всій планеті. Цей фактор також відноситься до холодильного обладнання. Безліч холодильних фірм-виробників прагнуть збільшити енергоефективність обладнання шляхом підвищення холодопродуктивності і зменшення енергоспоживання.

Також ця тема стосується і торговельного холодильного обладнання, оскільки у великих магазинах дуже велика кількість одиниць такого обладнання.

**Метою та завданням даного дослідження** розглянути особливості роботи транскритичної холодильної системи, проаналізувати особливості обладнання, яке входить до холодильної системи на CO<sub>2</sub>.

**Об'єктом дослідження** є транскритична бустерна холодильна установка на R744. Транскритичні холодильні системи на CO<sub>2</sub> широко поширені в системах холодопостачання підприємств рітейлу (більше 7500 діючих об'єктів по всьому світу). Порівняно з традиційними установками на ГФВ холодоагентах, у помірному кліматі застосування транскритичної системи дозволяє знизити річне енергоспоживання на 15–20%. Окремо необхідно відзначити високий потенціал рекуперації тепла, що в більшості випадків повністю забезпечує потребу магазину в опаленні та гарячому водопостачанні. Бустерні системи з транскритическим циклом CO<sub>2</sub> вважаються найбільш перспективним варіантом застосування природних холодоагентів в сегменті роздрібної торгівлі у всіх країнах, де клімат не дуже жаркий. Транскритичні системи практично не застосовуються в промислових холодильних установках.

**Основним методом дослідження** є аналітичний огляд сучасних систем централізованого холодопостачання на CO<sub>2</sub>, визначення переваг та недоліків систем холодопостачання торговельних підприємств із застосуванням CO<sub>2</sub> під час вибору інженерного рішення, виявлення перспективних тенденцій сучасного проектування холодильних систем торговельних підприємств.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 7    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Використовуючи сучасне обладнання , можна зменшити споживання електроенергії до 30 %. Наприклад, власник магазину перейшов від старого обладнання до сучасного , в результаті чого, місячна плата за електроенергію зменшилась в середньому на 900 грн/міс. Це було підтверджено тахометром споживання електроенергії.

Отже має сенс вкладання грошей у нове обладнання, тим самим зменшити плату за електроенергію , та отримати якісну та ефективну роботу обладнання.

Сьогодні багато торгових підприємств займають перші поверхи житлових будинків. Це пов'язано з тим, що будівництво окремо розташованої торгового комплексу потребує великих інвестицій, і тому підприємці прагнуть розміщувати збільшувати торгові площі за рахунок реконструкції старих магазинів. Природно, такі вбудовано-прибудовані до житлових будинків магазини при використанні в них холодильних систем з вбудованими агрегатами створюють властиву для цього типу обладнання проблему - підвищений, а найчастіше неприпустимий рівень шуму. По всій протяжності лінії морозильних ванн і охолоджуваних стелажів шум від вбудованих агрегатів створює істотні проблеми для мешканців будинку, відвідувачів і власників торгового підприємства. Використання систем виносного холоду кардинально вирішує проблему: звук концентрується в одному місці (машинне відділення) і його легше локалізувати. Що стосується стандартів, використання систем виносного холоду дозволяє не перевищувати рівень шуму 40 дБА. Таким чином, підвищується рівень комфорту торгового підприємства, що, безсумнівно, приваблює покупців.

Іншою істотною перевагою використання систем виносного холоду є відсутність в торговому залі і підсобних приміщеннях тепловіддачі від працюючих агрегатів. При роботі великої кількості вбудованих агрегатів, в торговому залі неминуче підвищується температура повітря. Особливо це помітно в літній період; коли температура повітря в магазині може бути навіть вище температури повітря на вулиці. Крім відсутності комфорту, підвищення температури повітря викликає нераціональний режим роботи агрегатів, а іноді

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 8    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



і їх аварійну зупинку. Можна, звичайно, впоратися з цією проблемою, витративши значну суму на покупку і устаткування торгових площ додатковими системами кондиціонування. Але, як правило, доцільніше використовувати системи виносного холоду, тепловіддача від яких відбувається поза приміщеннями магазину.

Центральні системи холодопостачання розраховані на тривалі терміни служби. Використовувані в системах виносного холоду компресори середньої і підвищеної потужності стійкіші до напружених режимам роботи. Термін служби таких компресорів складає не менше 8-10 років; вбудовані малі холодильні агрегати прослужать не більше 4 - 5 років. Вартість систем виносного холоду, безумовно, вище, тим не менш, все більше і більше власників торгових підприємств вибирають саме виносний холод, так як навіть при більш високих початкових витратах вони отримують більш надійне і якісне обладнання з високою експозиційної і завантажувального здатністю, яке прослужить їм довгий час.

Високу надійність централізованих систем холодопостачання забезпечує резервування холодильної потужності. «Гаряче» резервування потужності на увазі ситуацію, коли з якихось причин один з компресорів централі зупиняється по аварійній захисту. У цьому випадку інші компресори продовжують роботу, і зупинка одного компресора не позначається на температурних режимах холодильного обладнання в торговому залі. Завдяки «гарячому» резервування потужності у фахівців сервісної служби з'являється можливість усунути неполадки, не зупиняючи роботу всього торгового підприємства. «Холодне» резервування потужності передбачає установку в центральній системі додаткового «резервного» компресора. Цей захід, хоч і передбачає додаткові фінансові витрати, дозволяє мати в резерві одиницю потужності, яка може бути введена в експлуатацію в екстреному випадку, і забезпечує тим самим стабільне функціонування всієї холодильної системи. Резервні компресори встановлюються, як правило, в Централь, які обслуговують великі торгові площі, де навіть невеликий простий частини

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 9    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

обладнання торгового залу обіцяє істотні фінансові втрати від зменшення торгового обороту, а, крім того, вимушена зупинка роботи магазину негативно впливає на імідж підприємства.

Як відомо, чим вище потужність компресора, тим вище його ККД. Використовувані в центральних системах компресори забезпечують помітно більш високий ККД, ніж вбудовані агрегати. А це обіцяє істотну економію у витраті електроенергії і, відповідно в експлуатаційних витратах.

Іноді, обладнавши підприємства торгівлі системами виносного холоду, фахівці стикаються з рядом проблем. Одна з них - проблема розміщення компресорних централей в підсобних приміщеннях магазину. У ряді випадків недостатньо великі дверні прорізи, коридори, незручні приміщення, великі габаритні розміри самих централей і т.д. не дозволяють встановити централь в машинному приміщенні, не вдаючись до її часткової розбиранні. У таких випадках централь вносять в приміщення по частинах і збирають безпосередньо на місці. Цей спосіб монтажу, звичайно, не дуже зручний: трудомісткість робіт по збірці централі в незабудованих умовах значно вище. Відомі випадки, коли для того, щоб встановити централь в підвальному приміщенні магазину, доводилося просто розбирати частину стіни підвалу. В іншому випадку, монтаж централі був пов'язаний з необхідністю її підйому краном для розміщення в горищному приміщенні будівлі, що зажадало створення спеціальної рамної конструкції. Практика показала, що при опрацюванні проекту універсаму з системою централізованого холодопостачання необхідно пам'ятати, що приміщення, куди передбачається встановити централь, має відповідати певним вимогам.

Деякі складнощі виникають з технічним обслуговуванням централізованих систем холодопостачання в регіонах, де недостатньо висококваліфікованих фахівців: надійна і безаварійна робота централей гарантується не тільки ретельним опрацюванням всього проекту, якісним монтажем, але також і подальшим кваліфікованим технічним

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 10   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

обслуговуванням. Тому фахівці рекомендують купувати такі системи в компаніях, які мають значний досвід і висококваліфікованим персоналом.

Централізовані системи холодопостачання оснащені мікропроцесорними блоками, які керують роботою всієї системи. Збої в електроживленні (ривки напруги, «пропажа» фаз) централей можуть привести до збоїв в роботі блоку управління. Тому дуже важливо, щоб централь була підключена до лінії електроживлення зі стабільним напругою, що відповідає нормі.

На практиці в універсамах з торговою площею до 800 м<sup>2</sup> і з комерційної точки зору вигідніше застосовувати змішані системи холодопостачання. У таких системах обладнання зі середньотемперату режимом роботи підключається до централізованої системи, а низькотемпературне - до одного або декількох винесених локальних агрегатів. У ситуаціях крайнього дефіциту площ використовують «компаундні» централі, що поєднують на одній рамі як середньо-, так і низькотемпературні компресори, що дозволяє в 2-2,5 рази зменшити площу машинного приміщення.

## **1.2 Огляд робочих тіл і схем холодильних систем.**

Прийняті міжнародними комітетами заходи, по запобіганню руйнування шару стратосферного озону, а також виникнення парникового ефекту в атмосфері із-за викидів агентів привели, починаючи з початку 90-х років, до радикальних змін в технологіях кондиціювання повітря і штучного охолодження.

До недавнього часу в цих системах використовувалися в основному озоноруйнуючі холодильні агенти, а саме R12, R22 і R502; для особливих цілей застосовувалися R114, R12B1, R13B1, R13и R503.

Промислово розвинені країни віднині не дозволяють використовувати ці холодильні агенти, окрім R22, у країнах Європейського Союзу, проте, в теперішній час вже діє поетапна програма відмови також і від R22.

Таке положення справ призводить до колосальних наслідків для всієї галузі штучного охолодження і кондиціювання повітря.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 11   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Хоча вже міцно увійшли до практики такі холодильні агенти на основі гідрофторвуглеродів (ГФУ - HFC), які немістять хлору, як R134a, R404A, R507A, R407C, R410A, а також NH<sub>3</sub> і різні вуглеводневі, все ще потрібно зробити немало, особливо у відношенні дії на глобальне потепління. Метою є істотне зменшення прямих викидів, що визвані витоками холодильних агентів, за рахунок використання високоефективних установок, змонтованих з надійних компонентів з високою якістю з'єднань трубопроводів.

У зв'язку з цим виконано велике число розробок; вже доступний щонайширший діапазон компресорів і устаткування для різних альтернативних холодильних агентів.

Результати декількох досліджень підтверджують, що зазвичай застосування в промислових цілях паро-компресійних холодильних установок, значно перевершують по ефективності установки, принцип дії яких заснований на інших процесах, при температурах кипіння біля -40°C.

Сьогодні особливе значення має вибір альтернативних холодильних агентів і конструкцій системи охолодження. Окрім вимоги відсутності озono-руйнуючого потенціалу (ODP=0) і потенціалу дії на глобальне потепління (GWP=0) суттєвим критерієм вибору є величина енергоспоживання систем охолодження, як непрямого вкладу в створення парникового ефекту.

Тому був розроблений метод розрахунку систем охолодження, що дозволяє проаналізувати їх сумарну дію на парниковий ефект.

У зв'язку з цим введений так називаємий чинник "TEWI" (Total Equivalent Warming Impact - сумарна еквівалентна дія на потепління), хоча результат визначається головним чином викидами CO<sub>2</sub> в залежності від використовуємого способу приводу або вироблення енергії. Тому, можливо в майбутньому оцінка дії холодильних агентів на навколишнє середовище буде різною в залежності від місця розташування установки і способу її приводу.

Детальніший розгляд ГФУ холодильних агентів - замінників (HFC) показує, проте, що можливості повністю порівняння однокомпонентних

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 12   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

холодильних агентів обмежені. Відносно сприятлива ситуація із заміною R12 на R134a, так само як і R502, на альтернативні R404A і R507A. Гірше йде справа із заміниками для інших хлоровмісних CFC, а також HCFC-холодильних агентів, наприклад, для R22.

Холодильні агенти R32, R15 і R134a розглядаємо як прямі ГФУ - холодильні агенти - замітники (HFC). Проте із-за їх специфічних характеристик вони можуть застосовуватися в чистому вигляді лише у виняткових випадках. В цьому відношенні найбільш важливими критеріями є займистість, термодинамічні властивості і потенціал впливу на глобальне потепління. Ці речовини більш придатні як компоненти сумішей, в яких окремі характеристики шляхом варіювання пропорцій суміші можуть бути приведені у відповідність вимогам.

Окрім ГФУ – холодильних агентів, як замітники розглядаються також аміак (NH<sub>3</sub>) і вуглеводневі. Їх промислове використання, проте, обмежується жорсткими вимогами безпеки.

Ілюстрації на наступних сторінках містять структурний огляд альтернативних холодильних агентів, а також інформацію про доступні в даний час однокомпонентні або сумішеві холодильні агенти.

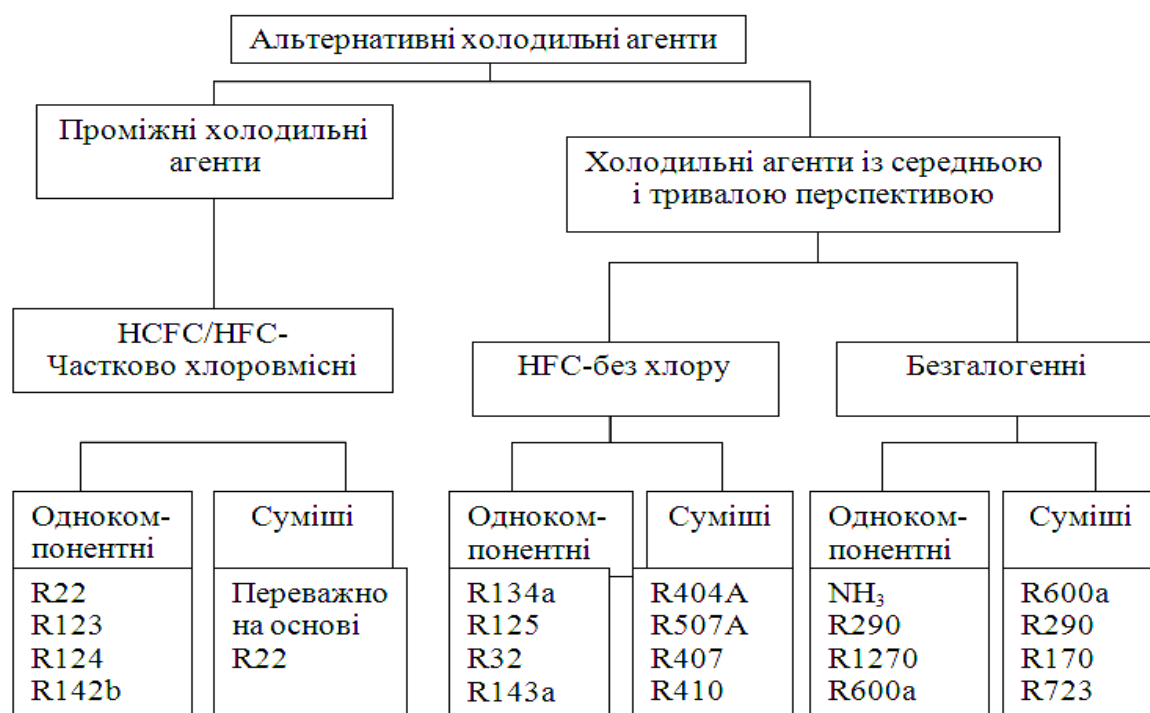


Рис.1.1 Альтернативні холодильні агенти

| Попередні<br>холодильні<br>агенти | Альтернативи                                     |                                                       |                                                         |                                                                                |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                                   | Класифікація                                     | Промислова<br>назва                                   | Фірми                                                   | Склад в сумішах                                                                |
| R12(R500)                         | R401A<br>R401B<br>R409A<br>R409B<br>R413A        | MP39<br>MP66<br>FX56<br>FX57<br>ISCEON 49             | DuPont<br>DuPont<br>Atofina/Solvay<br>Atofina<br>Rhodia | R22/152a/124<br>R22/152a/124<br>R22/124/142b<br>R22/124/142b<br>R134a/218/600a |
| R502                              | R22<br>R402A<br>R402B<br>R403A<br>R403B<br>R408A | -<br>HP80<br>HP81<br>ISCEON 69S<br>ISCEON 69L<br>FZ10 | -<br>DuPont<br>DuPont<br>Rhodia<br>Rhodia<br>Atofina    | -<br>R22/125/290<br>R22/125/290<br>R22/218/290<br>R22/218/290<br>R22/143a/125  |
| R114<br>R12B1                     | R124<br>R124                                     | -                                                     |                                                         |                                                                                |

Рис.1.2 Альтернативи для CFC холодильних агентів (проміжні (перехідні) холодильні агенти)

Як вже згадувалося у вступі була розроблена методика оцінки дії окремих холодильних установок на ефект глобального потепління (TEWI = Total Equivalent Warming Impact - сумарна еквівалентна дія на потепління).

Всі галогеновуглеводневі холодильні агенти, включаючи гідрофторвуглероди (HFC), що не містять хлору відносяться до категорії парникових газів. Викиди цих речовин вносять вклад у глобальний парниковий ефект. Міра їх дії значно більше в порівнянні з CO<sub>2</sub>, що є, парниковим газом в атмосфері. Наприклад, якщо узяти тимчасовий інтервал в 100 років, викид 1 кг R134a приблизно еквівалентний викиду 1300 кг CO<sub>2</sub> (GWP100 = 1300). Вже з цих фактів ясно, що зменшення викидів холодильних агентів має бути одному з основних завдань в майбутньому.

З іншого боку, основний вклад в дію, зі сторони холодильних установок на глобальне потепління, вносять викиди (косвенні) CO<sub>2</sub> при виробленні енергії. З врахуванням високого відсотка використання викопного палива на електростанціях, середня величина викида CO<sub>2</sub> в Європі складає близько 0,6

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 14   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

кг на один кіловат електроенергії. В результаті установка за час її служби вносить істотний вклад до парникового ефекту.

Окрім вимоги використання альтернативних холодильних агентів з термодинамічно-сприятливим енергоспоживанням, необхідно також зробити акцент на необхідність використання вискоєфективних компресорів і супутнього устаткування, а також оптимізованих компонентів систем зважаючи на їх значиму долю в загальному балансі.

Порівнюючи різні конструкції компресорів, можна бачити, що непрямі викиди CO<sub>2</sub> унаслідок підвищеного енергоспоживання можуть надавати більшу сумарну дію на парниковий ефект, чим викиди холодильних агентів.

На рис. 1.3 показана зазвичай застосовувана формула розрахунку чинника TEWI з відповідним виділенням різних напрямів дії на глобальне потепління.

У всьому світі додаються зусилля для зменшення викиду парникових газів, і вже частково розроблені офіційні нормативи. В даний час для території Євросоюзу розробляється "Положення про гази", що містять фтор, яке набуло чинності, для держав-членів Євросоюзу в 2006 році.

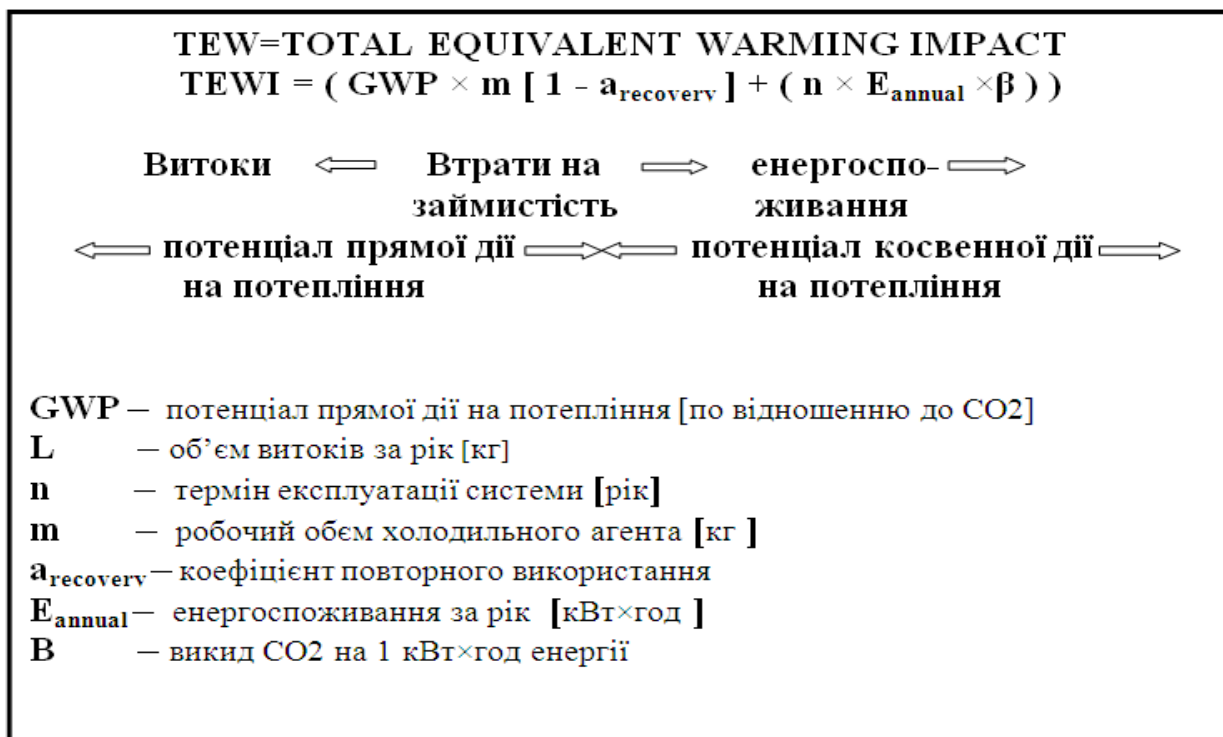


Рис.1.3 Методика розрахунку TEWI

Таблиця 1.1 Характеристики холодильних агентів

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 15   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

| Тип<br>холодиль-<br>ного агента                       | Температу<br>ра кипіння<br>°C | Критична<br>температу<br>ра °C | Темпера<br>тура<br>конденс<br>ації при<br>26 бар,<br>°C | Холодопродукт<br>ивність, % | COP, % | Температу<br>ра<br>нагнітання<br>, °C |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------------|
| 1                                                     | 2                             | 3                              | 4                                                       | 5                           | 6      | 7                                     |
| Холодильні агенти HCFC                                |                               |                                |                                                         |                             |        |                                       |
| R22                                                   | -41                           | 96                             | 63                                                      | 80(L)                       | 88(4)  | +35(4)                                |
| R124                                                  | -11                           | 122                            | 105                                                     | 80(L)                       | 88(4)  | +35(4)                                |
| R142b                                                 | -10                           | 137                            | 110                                                     | -                           | -      | -                                     |
| Проміжні суміші HCFC/HFC (перехідні альтернативи)     |                               |                                |                                                         |                             |        |                                       |
| R401A                                                 | -33                           | 108                            | 80                                                      | 107(M)                      | 100    | +13                                   |
| R401B                                                 | -35                           | 106                            | 77                                                      | 108(L)                      | 98     | +18                                   |
| R409A                                                 | -34                           | 107                            | 75                                                      | 109(M)                      | 99     | +7                                    |
| Без галоїдні холодильні агенти (тривала альтернатива) |                               |                                |                                                         |                             |        |                                       |
| R717                                                  | -33                           | 133                            | 60                                                      | 100(M)                      | 105    | +60                                   |
| R723                                                  | -37                           | 131                            | 58                                                      | 105(M)                      | 106    | +35                                   |
| R600a                                                 | -12                           | 135                            | 114                                                     | -                           | -      | -                                     |
| R290                                                  | -42                           | 97                             | 70                                                      | 89(M)                       | 102    | -25                                   |
| R1270                                                 | -48                           | 92                             | 61                                                      | 112(M)                      | 101    | -20                                   |
| R170                                                  | -89                           | 32                             | 3                                                       | -                           | -      | -                                     |
| R744                                                  | -57                           | 31                             | -11                                                     | -                           | -      | -                                     |

H – висока температура (+7/55 °C),

M – середня температура (-10/40°C)

L – низька температура (-35/40°C)

Приведенні технічні дані являють собою середні значення, що базуються на калі метричних дослідженнях.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 16   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



Продовження таблиці 1.2

| Суміші що не містять хлору HFC (тривала альтернатива) |     |    |    |        |    |     |
|-------------------------------------------------------|-----|----|----|--------|----|-----|
| R404A                                                 | -47 | 73 | 55 | 99(L)  | 98 | -9  |
| R507A                                                 | -47 | 71 | 54 | 102(L) | 98 | -10 |
| R407A                                                 | -46 | 83 | 56 | 78(L)  | 96 | +11 |
| R407B                                                 | -48 | 76 | 53 | 93(L)  | 98 | -2  |
| R422A                                                 | -49 | 72 | 56 | -      | -  | -   |
| R407C                                                 | -44 | 87 | 58 | 100(H) | 95 | -8  |
| R417A                                                 | -43 | 90 | 68 | 97(H)  | -  | -25 |
| R419A                                                 | -43 | 79 | 64 | -      | -  | -   |
| ISCEON29                                              | -45 | 81 | 62 | -      | -  | -   |
| R410A                                                 | -51 | 72 | 43 | 142    | 95 | -6  |
| FX80                                                  | -51 | 70 | 44 | -      | -  | -   |
| ISCEON89                                              | -55 | 70 | 50 | -      | -  | -   |
| R508A                                                 | -86 | 13 | -3 | -      | -  | -   |
| 1                                                     | 2   | 3  | 4  | 5      | 6  | 7   |
| R508B                                                 | -88 | 14 | -3 | -      | -  | -   |

Холодильний агент NH<sub>3</sub> протягом більш ніж одного століття застосовувався в промислових і великих холодильних установках. У нього немає озоноруйнуючого потенціалу і прямого потенціалу дії на глобальне потепління. Його ефективність принаймі не менше, ніж в R22, а в деяких випадках навіть краще; тому його непрямий вклад в ефект глобального потепління малий. Крім того, його вартість незрівнянно нижче. Результуючи, можна задатися питанням: чи є він ідеальним холодильним агентом і оптимальною заміною для R22 або альтернативи гідрофторвуглеородам? Поза сумнівом, NH<sub>3</sub> володіє багатьма позитивними якостями, які можна використовувати також і у великих холодильних установках.

|                                                        |     |     |     |        |     |     |
|--------------------------------------------------------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|
| R409B                                                  | -35 | 105 | 73  | 100(M) | 100 | +6  |
| R413A                                                  | -35 | 101 | 76  | 105(M) | 100 | -9  |
| R402A                                                  | -49 | 75  | 53  | 109(L) | 100 | -0  |
| R402B                                                  | -47 | 83  | 56  | 99(L)  | 98  | +16 |
| R403A                                                  | -50 | 93  | 57  | 105(L) | 99  | +17 |
| R403B                                                  | -51 | 90  | 54  | 112(L) | 100 | -0  |
| R408A                                                  | -44 | 83  | 58  | 98(L)  | 100 | +10 |
| Холодильні агенти без хлору HFC (тривала альтернатива) |     |     |     |        |     |     |
| R134a                                                  | -26 | 101 | 80  | 97(M)  | 103 | -8  |
| R152a                                                  | -24 | 113 | 85  | -      | -   | -   |
| R125                                                   | -48 | 66  | 51  | -      | -   | -   |
| R143a                                                  | -48 | 73  | 56  | -      | -   | -   |
| R32                                                    | -52 | 78  | 42  | -      | -   | -   |
| R227ea                                                 | -16 | 102 | 96  | -      | -   | -   |
| R236fa                                                 | -16 | 120 | 117 | -      | -   | -   |
| R23                                                    | -82 | 26  | 1   | -      | -   | -   |

На жаль, мають місце і негативні риси, обмежуючі широке комерційне використання аміаку або вимагаючі споживання витратних, а інколи і нових технічних рішень.

Недоліком NH<sub>3</sub> є високий адіабатичний показник (NH<sub>3</sub> = 1,31 / R22= 1,18 / R12=1,14), що відбивається на температурі нагнітання, яка істотно вище, навіть чим в R22. Тому одноступінчатє стискування вже неможливе при роботі з температурою кипіння приблизно в 10°C і нижче. Слід застосовувати двоступінчатє стискування.

Проблемою при підборі відповідних масел є також і незадовільна їх розчинність в холодильних агентах в невеликих установках. Масла, що раніше застосовувалися, не розчинялися холодильним агентом. Вони вимагають відділення за допомогою витонченої технології і серйозне обмеження

використання випаровувачів прямого випаровування із-за погіршення якості при теплопереносі.

Із-за високих температур нагнітання особливі вимоги пред'являються до термостабільності мастил. Це особливо критично для автоматичної роботи, коли масло роками повинне залишатися в контурі без погіршення своїх властивостей.

NH<sub>3</sub> володіє надзвичайно високою різницею ентальпії при фазових переходах і в результаті порівняно малою масовою витратою при циркуляції (приблизно від 13 до 15% порівняно із R22). Ця властивість вважається перевагою для крупних установок, але ускладнює регулювання уприскування холодильного агента на малопотужних установках.

Наступним критерієм, який повинен бути розглянутий, є корозійна дія на мідні матеріали; тому трубопроводи мають бути виготовлені із сталі. Перешкодою є також вимога аміакостійкості обмоток двигунів. Ще однією трудностю являється електропровідність холодильного агента при підвищеному вмісті води.

До інших негативних рис можна віднести токсичність і легкозаймистість, що вимагають особливих заходів безпеки при спорудженні і експлуатації таких установок.

При сучасному стані технологій промислові системи на NH<sub>3</sub> вимагають абсолютно інші технології монтажу і експлуатації установок в порівнянні із звичайними промисловими системами.

Унаслідок нерозчиненості в мастилі і специфічних характеристик холодильного агента зазвичай застосовуються високоефективні маслорозділювачі і випаровувачі затопленого типу з гравітаційною або примусовою циркуляцією. Із-за небезпеки для тих, хто оточує і охолоджує продукт випаровувач часто не може бути встановлений безпосередньо в зоні охолодження. Тому тепло-перенесення доводиться здійснювати через вторинний контур холодоносія.

Лінії холодильного агента, теплообмінники і арматура повинні

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 19   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

виготовлятися із сталі; трубопровідні лінії зважаючи на їх більший розмір підлягають перевірці атестованим інспектором.

Зазвичай застосовують холодильний компресор відкритого типу, в якого привідний двигун є окремим від компресора агрегатом.

Ці заходи істотно підвищують затрати, пов'язані з установками NH<sub>3</sub>, особливо при середній і малій продуктивності.

Тому додаються зусилля з метою розробки простіших систем, які могли б застосовуватися і в комерційній сфері.

Частиною програм дослідження являється випробовування частково розчинних мастил з метою поліпшення циркуляції мастила в системах. Як альтернативи розглядаються також упрощені способи автоматичного повернення нерозчинних мастил.

Отриманий до теперішнього часу досвід показав, що системи з частково розчинним мастилом важкі в управлінні. Вода, що міститься в системі, має серйозний вплив на хімічну стабільність контура і знос компресора. Крім того, високий вміст холодильного агента в мастилі призводить до сильного зносу підшипників і інших рухливих частин. Це відбувається із-за сильної зміни об'єму при випаровуванні NH<sub>3</sub> в зоні змащування.

Існують також рішення з герметизацією установок NH<sub>3</sub>. Компактний рідинний холодильник (заправка холодильним агентом менше 50 кг) встановлюється в закритий контейнер; аміак при витоках поглинається вбудованим водяним резервуаром. Такі компактні вузли можна встановлювати в місцях, які із-за вимог безпеки раніше були зарезервовані для установок з галогеновмісними холодильними агентами.

Виробнича програма включає сьогодні обширний вибір оптимізованих аміачних компресорів для різних типів мастил:

- Одноступінчаті поршневі компресори відкритого типу (подача від 19 до 152 м<sup>3</sup>/год при 1450 об/хв) для кондиціонування повітря, для середньотемпературного охолодження і бустер-компресорів.

- Гвинтові компресори відкритого типу (подача від 84 до 250 м<sup>3</sup>/год при

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 20   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

паралельній роботі до 1500 м3/год при 2900 об/хв) для кондиціювання повітря, середньо- і низькотемпературного охолодження.

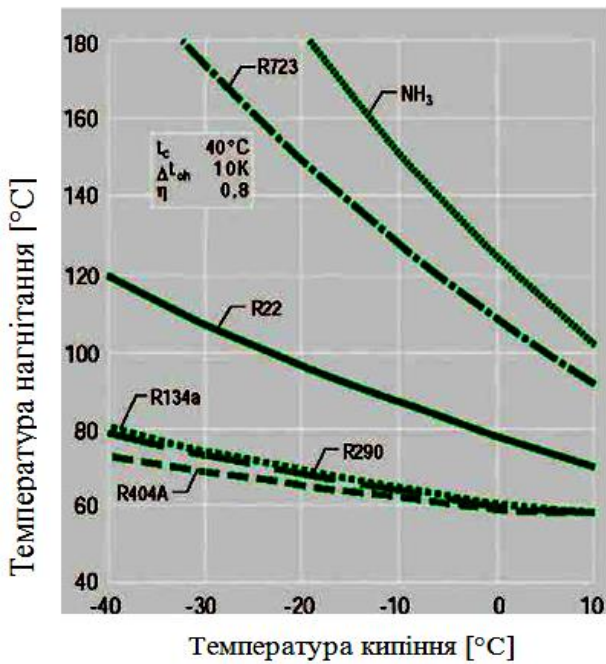


Рис.4 Порівняння температур нагнітання.

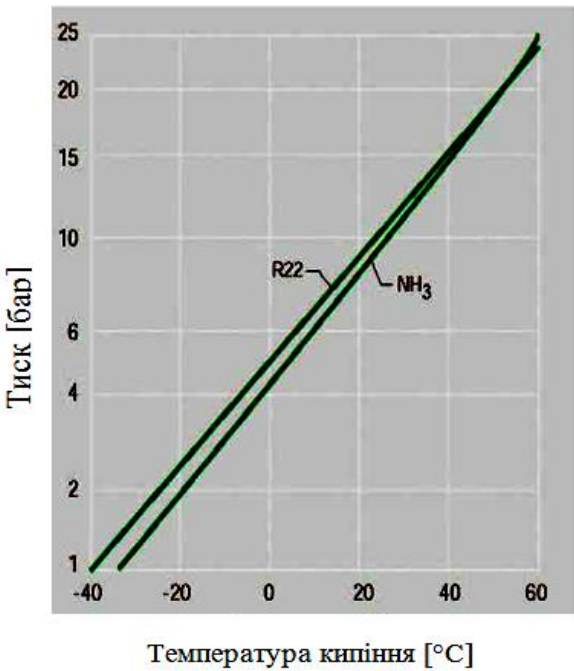


Рис.5 Порівняння рівнів тисків.

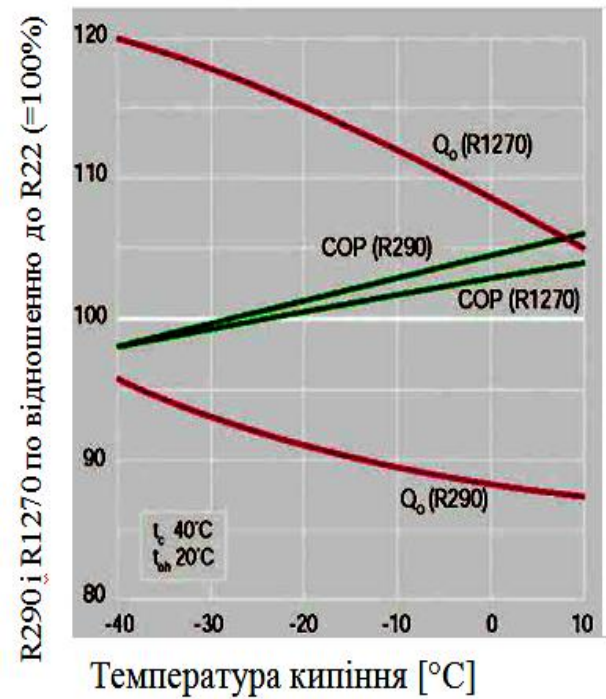


Рис.1.6 R290/R1270/R22 - порівняння холодопродуктивності напівгерметичних компресорів.

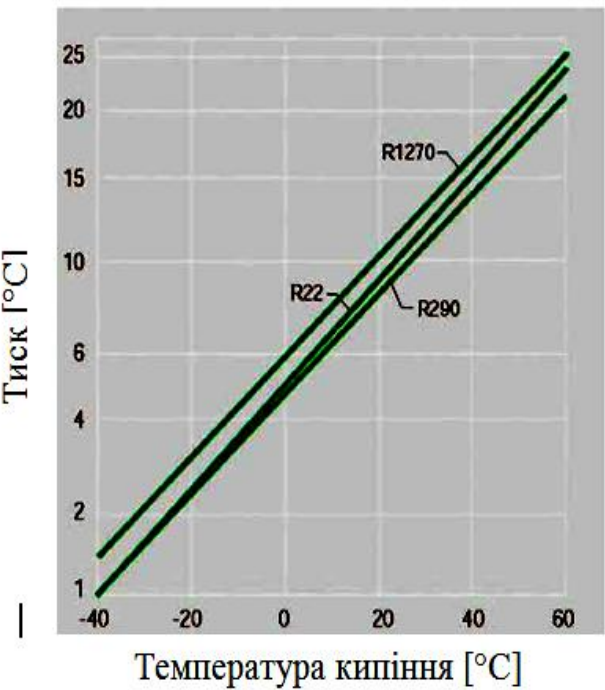


Рис. 1.7 R290/R1270/R22 - порівняння рівнів тиску.

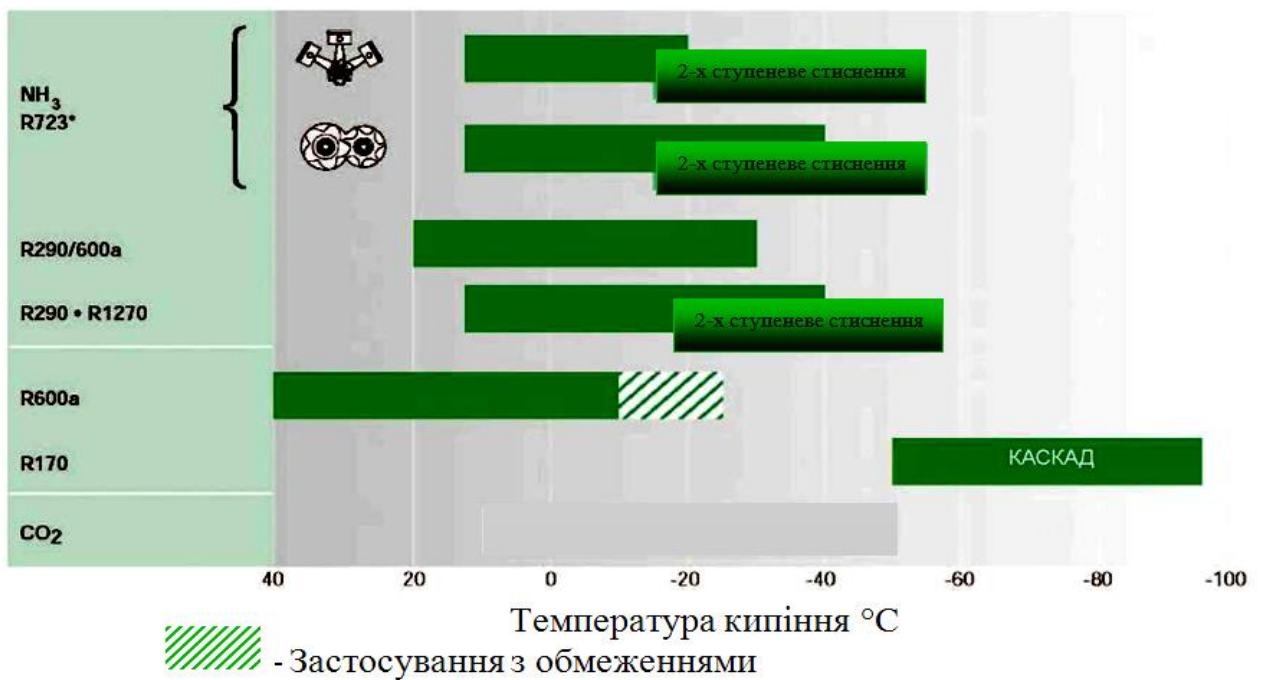


Рис.1.8 Области застосування холодильних агентів.

| Мастила/<br>холодильні<br>агенти | Мінеральне<br>масило(MO) | Алілбензол<br>(AB) | (MO + AB) | Поліальфа-<br>олефіні(РАО) | Поліолефір<br>(РОЕ) | Полівініл-фір<br>(PVE) | Поліізоколь<br>(PAG) | Мінеральне<br>масло с гід-<br>роочисткою |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------|-----------|----------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|------------------------------------------|
| (H)CFC                           |                          |                    |           |                            | Δ-VG                |                        |                      |                                          |
| NH3 * R723                       |                          |                    |           |                            | Δ-VG                |                        |                      |                                          |
| Суміші                           |                          |                    |           |                            | ⓘ                   | Δ                      |                      |                                          |
| HFC+суміші                       | VG                       | VG                 | VG        | VG                         | VG                  |                        | Δ                    |                                          |
| Вуглеводневі                     |                          |                    |           |                            |                     |                        | Δ                    |                                          |

Хороша пригодність  
 Застосування з обмеженнями  
 Непридатне  
 - Особливо критично при вологості  
 -Можлива підвищена основна вязкість  
 -Розширена програма випробовувань

Рис.1.9 Масла для компресорів.

### 1.3 Застосування CO2 в каскадних системах.

Завдяки сприятливим для довкілля характеристикам, низькій токсичності і привабливим фізико-хімічним властивостям, у випадку "докритичного" функціонування, вуглекислота (CO2) усе більш цікавить розробників як



переважний холодоносіє для вторинного контуру, а також як холодильний агент для низькотемпературних каскадних систем. При звичайному низькотемпературному використанні видно особливо високу питому холодопродуктивність CO<sub>2</sub> порівняно із іншими холодильними агентами. Використання вуглекислоти дозволить значно знизити вартість холодильної установки, за рахунок економії на компресорі, трубопроводах і арматурі.

Навіть із врахуванням того, що каскадні системи володіють великою продуктивністю, вживання CO<sub>2</sub> дозволяє використовувати в них компресори, розраховані на комерційне або на мале індустріальне використання. Проте, високі робочі тиски визначають особливі вимоги до конструкції компресора і до систем безпеки.

У цій роботі приведені схемні рішення холодильних установок з CO<sub>2</sub>, а також детально розглянуті основні напрями розробки спеціальної компресорної техніки і холодильних масел для CO<sub>2</sub>. Крім того, викладені заходи експлуатаційної безпеки установок на CO<sub>2</sub>, а також їх характеристики продуктивності в порівнянні із звичайними установками.

Після багатолітнього періоду досить скромного інтересу до CO<sub>2</sub> у розробників холодильної техніки вуглекислота останніми роками привертає до себе особливу увагу, перш за все, із-за екологічних проблем, що загострилися. Разом з розробками проектів з "транс критичними" умовами функціонування останніми роками були успішно введені в експлуатацію багато "до критичних" каскадних систем для комерційного і промислового низькотемпературного охолодження з температурами випаровування нижче -50°C. Слід мати на увазі, що CO<sub>2</sub> в порівнянні з іншими холодильними агентами володіє сприятливішими термофізичними властивостями для даного діапазону температур. Вуглекислота також є хімічно інертною, пожаро- і вибухобезпечною речовиною, але шкідливим для здоров'я людини у великих концентраціях. Всі ці властивості визначають у багатьох випадках явну перевагу CO<sub>2</sub> над аміаком.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 23   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

До цих пір у холодильних системах з CO<sub>2</sub> використовувалися поршневі і гвинтові компресори відкритого типу. Проте, високий рівень робочих тисків потребує особливих вимоги і, тим самим, підвищує вартість такого компресора. У зв'язку з цим останнім часом зріс інтерес до напівгерметичних компресорів, які є аналогічними до встановлюємих в холодильні агрегати, що випускаються серійно, вживання яких дозволило б значно здешевити перспективні установки.

На сьогоднішній день вже реалізовано багато проектів з напівгерметичними дослідними прототипами. У подальших розділах роботи описаний накопичений досвід по створенню надійних спеціалізованих для CO<sub>2</sub> компресорів, а також систем безпеки для них.

### 1.3.1 Каскадні системи із CO<sub>2</sub>.

На рис.1.10 показана спрощена схема холодильної установки, в якій CO<sub>2</sub> зріджується у випаровувачі первинного холодильного контуру (з холодильними агентами NH<sub>3</sub>, HC (пропан, пропилен) або HCFC/HFC) і транспортується циркуляційним насосом прямо у випаровувач системи середньотемпературного охолодження. У сучасних каскадних CO<sub>2</sub>-ступенях передбачений додатковий LT- ресивер низького тиску, який підтримується на рівні тиску випаровування CO<sub>2</sub> за рахунок відсмоктування пари одним або декількома одноступеневими компресорами. Компресор нагнітає пари CO<sub>2</sub> в каскадний охолоджувач (конденсатор) разом з газом з середньотемпературного випаровувача. У охолоджувачі сумарний газовий потік конденсується і потім поступає у відповідний MT- ресивер. З нього відбувається перепускання рідини в ресивер низького тиску за допомогою поплавкового клапана.

Циркуляційні насоси або системи гравітаційної циркуляції використовуються для подачі CO<sub>2</sub> до місця його охолодження фреоновими системами. Для виключно низькотемпературного охолодження компоненти середньотемпературного контуру не використовуються.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 24   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



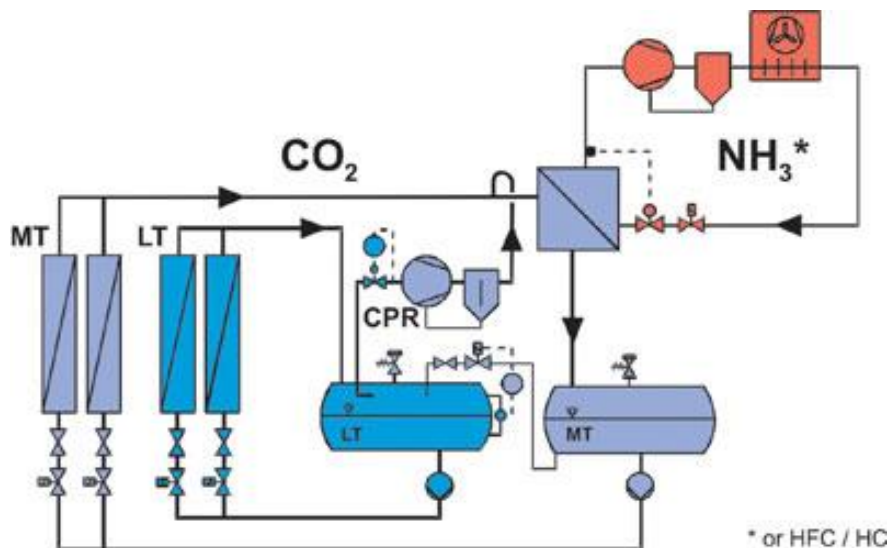


Рис.1.10. Каскадна система із CO2 (спрощена схема).

На Рис 1.11 показана спрощена схема двох-каскадної системи, в якій CO2 використовується якості звичайного холодильного агенту другого каскаду. Установки з такою схемою дуже поширені в країнах Скандинавії і вважаються дуже перспективними для комерційного вживання. У холодильних системах для типових супермаркетів в другому низькотемпературному каскаді CO2 нагнітається в конденсатор-теплообмінник поршневи́ми компресорами "Бітцер" серії Октагон: С-1К, С-2К, модифікованими для CO2

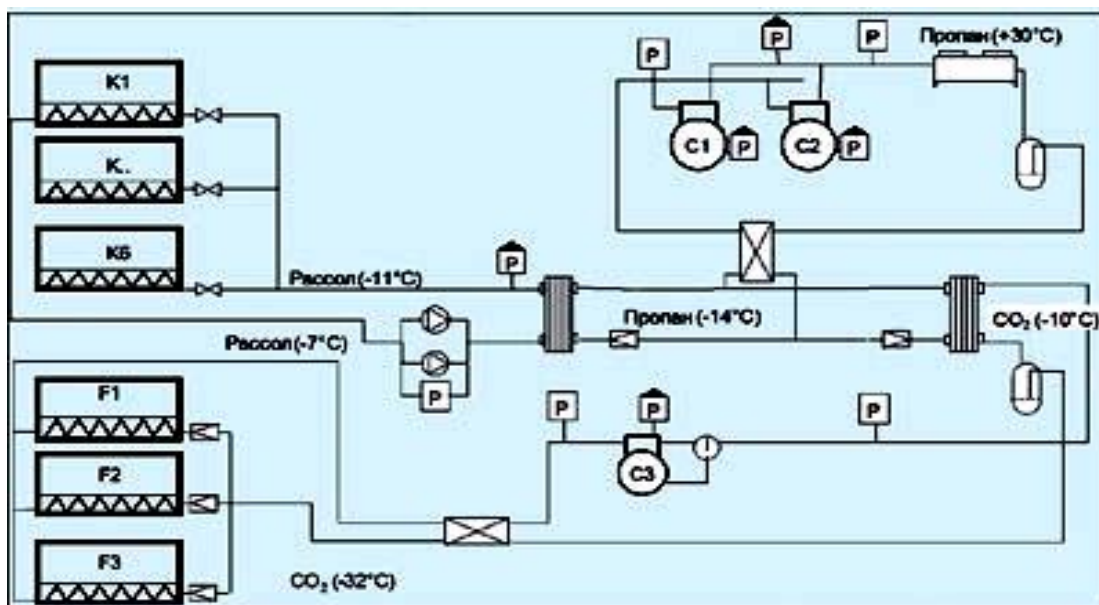


Рис.1.11 Каскадна система з CO2 (спрощена схема)

### 1.3.2 Вимоги до компресора в каскаді CO2.

|     |      |          |        |      |      |
|-----|------|----------|--------|------|------|
|     |      |          |        |      | Арк. |
|     |      |          |        |      | 25   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |      |

CO<sub>2</sub> набуває властивості рідини при досягненні порівняно високого рівня тисків при досить низьких температурах випаровування і конденсації. Ці тиски в деяких випадках значно перевищують допустимі робочі значення для типових стандартних компресорів (рис.1.11). При порівнянні робочого режиму установки з R22, з температурою випаровування -35°C (SST) і температурою конденсації -10°C (SCT) для CO<sub>2</sub> це відповідає "+30°C/+64°C". Такі робочі умови в реальних установках зустрічаються дуже рідко. Не дивлячись на низьку густину пари CO<sub>2</sub> порівняно із галогеновмісними холодильними агентами (рис. 2.10) такі термо-фізичні властивості виражаються в більш високому механічному навантаженні на привід компресора, а отже, в необхідності певного зростання потребуемого приводного моменту. Більш того, при проектуванні устаткування слід розглядати навіть ще більш екстремальні умови навантаження.

Інший критичний чинник пов'язаний з мастилом компресора. При досить високому тиску всмоктування деякі холодильні масла розчиняють в собі значний відсоток CO<sub>2</sub>. Внаслідок чого, кінематична в'язкість суміші, що утворилася, значно понижена. При використанні напівгерметичних компресорів слід також враховувати сумісність матеріалу ізоляції обмоток і суміші масла з CO<sub>2</sub>. Охолодження електромотора - це інший важливий аспект. На сьогодні він є особливо спірним і таким, що викликає багато сумнівів через те, що від мотора з невеликими розмірами потрібний високий приводний момент.

З врахуванням особливих властивостей CO<sub>2</sub>, вказаних вище стає ясно, що стандартні напівгерметичні компресори можуть використовуватися лише в дуже обмеженої сфери застосування. Останні досягнення фірми "Бітцер" в цьому напрямі показують, що при комбінуванні різних компонентів одного сімейства компресорів, а також при відповідній модифікації конструкції і використанні відповідного масла всі категоричні вимоги можуть бути виконані.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 26   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

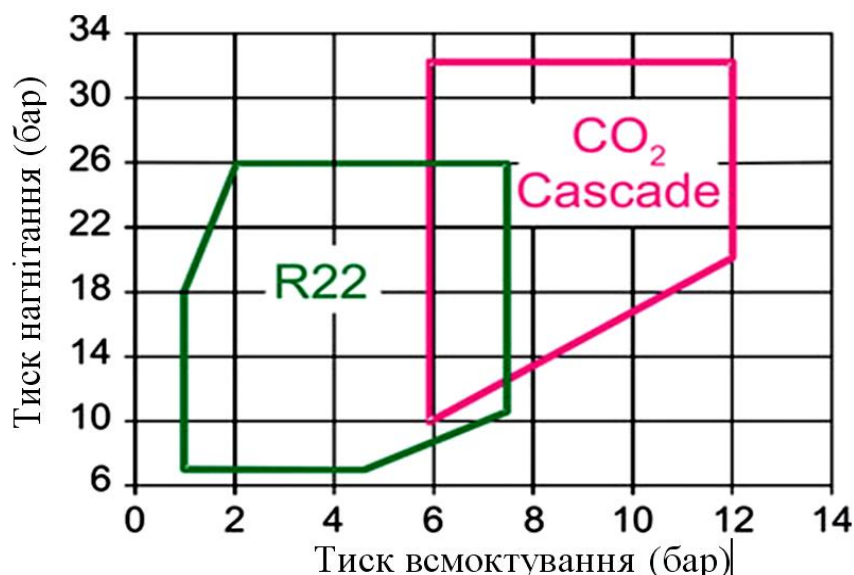


Рис.1.12 CO<sub>2</sub>/R22 - Порівняння значень тисків випаровування і конденсації в межах стандартної області функціонування

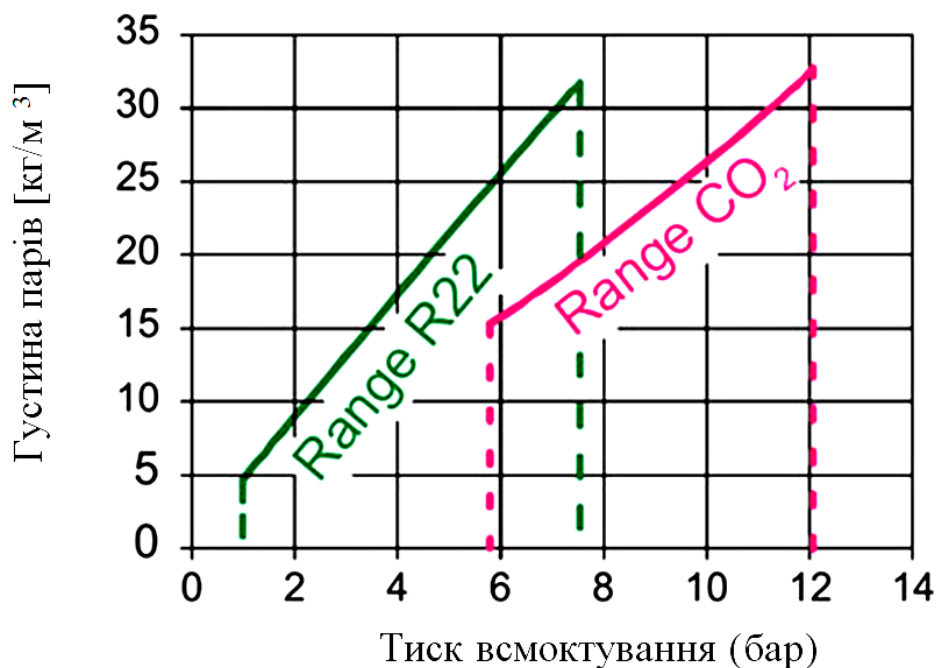


Рис.1.13 CO<sub>2</sub>/R22 - Порівняння значень густини пару в межах стандартних діапазонів тисків всмоктування.

### 1.3.3 Напрямки розробок/особливості конструкції.

Навантаження і тиски.

Сучасні напівгерметичні компресори проектується з п'ятикратним запасом міцності по внутрішньому тиску, і це повинно підтверджуватися при проведенні регулярних перевірок. Навіть з врахуванням наявності внутріш-

нього запобіжного клапана тиску, типом зовнішніх запобіжних клапанів, а також з врахуванням індивідуальних випробувань згідно з відповідними розпорядженнями ЄС звичайні границі застосування (НР - високий тиск 28 бар/ LP - низький тиск 19 бар) можуть бути підведені ще вище.

При необхідності, рекомендується застосовувати прокладки з металевим посиленням або підтримуючі елементи в ущільненнях. Вживання чавуну з сферичною графітною структурою замість сірого чавуну для лиття кор.-пусних деталей дозволяє підвищити їх механічну міцність при тій же товщині стінок.

Механічне навантаження / Необхідний приводний момент.

Порівнюючи максимальні робочі умови компресорів по діаграмі на Рис 1.12, ми бачимо, що тиски випаровування і конденсації CO<sub>2</sub> перевищують приблизно на 60 % і 20 % відповідно нормальні максимальні значення робочих тисків для R22. Самий простий шлях пристосування компресора для роботи на CO<sub>2</sub> - це комбінування в одному типовому корпусі певної серії компресорів найменшої об'ємної продуктивності з найбільшою потужністю мотора. Для поршневого компресора це означає використання найменшого діаметру поршнів, що приведе в результаті до зниження навантаження на підшипники і зменшення згинаючого зусилля на калінвал. Це також відноситься і для підшипників пальців шатунів, які також сприймають значні навантаження. У малих поршневих компресорах пальці, як правило, ковзають безпосередньо в деталях, що сполучаються, але з врахуванням специфічних навантажень при роботі на CO<sub>2</sub> необхідно на пальці встановлювати додаткові підшипники ковзання.

У зв'язку з більш високою масовою витратою конструкція клапанів компресора також має бути модифікована.

В разі використання гвинтових компресорів можливе застосування коротких роторів, а також, залежно від об'ємної продуктивності, великих підшипників. Тому що в каскадних системах при звичайних умовах

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 28   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

функціонування на низьких співвідношеннях робочих тисків реалізація даної концепції не призводить до зниження ефективності (к.к.д.).

З метою оберегти компресор від надмірних механічних навантажень на найважчих режимах, а також мотор від перевантажень на лінію всмоктування, безпосередньо на вході в компресор, встановлюють регулятор тиску в картері. Його налаштовують так, щоб після пуску компресора тиск всмоктування стабілізувався нижче за допустимий максимум.

Охолодження мотора.

Зважаючи на високе питоме навантаження на мотор у поєднанні з його малим об'ємом, повітряне охолодження у багатьох випадках виявляється незадовільним із-за недостатньої площі зовнішньої поверхні моторної частини корпусу компресора. Вибір лише такого способу охолодження вимагав би розробки спеціальної конструкції компресора для CO<sub>2</sub> і, тим самим, істотно понизив би перевагу від використання стандартних вузлів, що виробляються серійно.

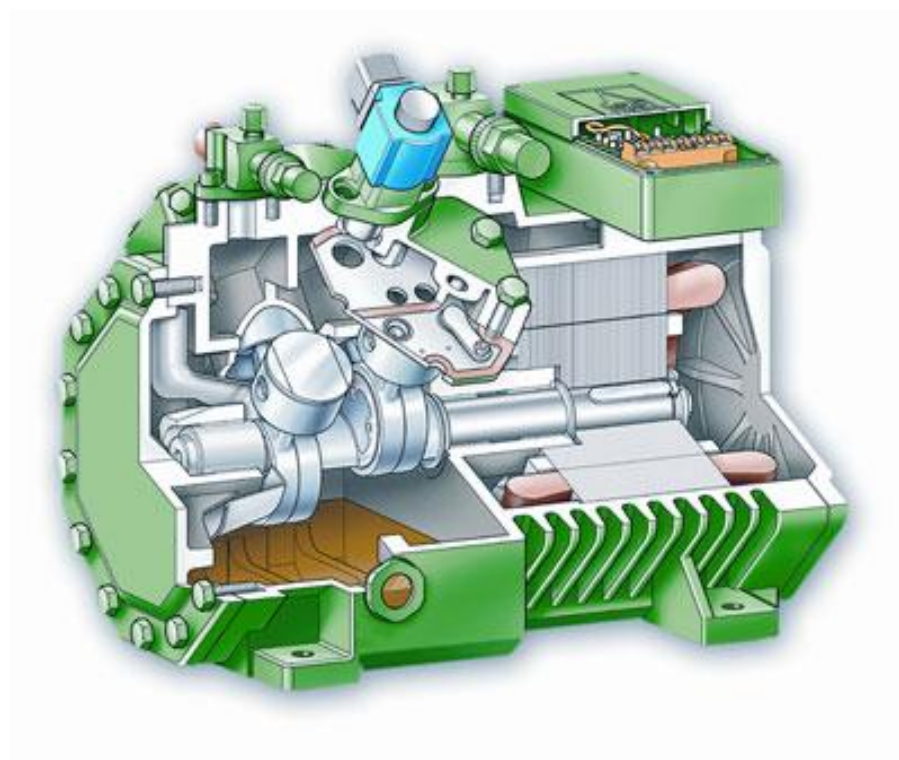


Рис.1.14 Розріз напівгерметичного поршневого компресора

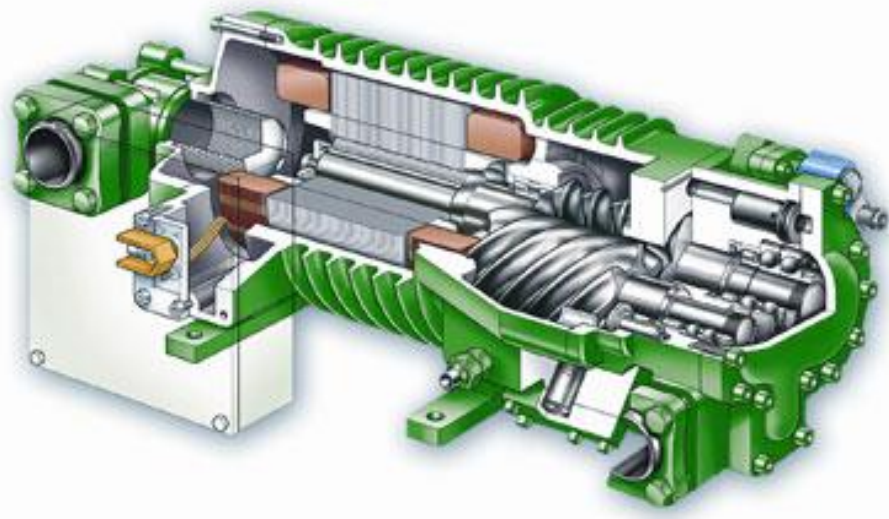


Рис.1.15 Розріз напівгерметичного гвинтового компресора (без масловідділювача)

Широко використовуване в напівгерметичних компресорах охолодження всмоктуваним газом обіцяє в цьому відношенні великі вигоди. Але при низькотемпературному охолодженні, а також при використанні холодильних агентів, що мають низьку питому ентальпію пари такий спосіб охолодження також неефективний, оскільки при цьому з'являється додатковий перегрів газу при протіканні через мотор, внаслідок чого змінюється питомий об'єм (щільність) газу і знижується його масова витрата.

При детальнішому розгляді цього питання виявляється, що втрати від охолодження всмоктуваним газом досить низькі в допустимій області функціонування. Причинами тому є висока масова витрата CO<sub>2</sub> і низький перегрів газу на всмоктуванні при використанні затоплених випаровувачів. Це забезпечує особливо інтенсивне охолодження мотора і гарантує низьку температуру обмоток, що визначає мінімальні теплові втрати і високу ефективність мотора.



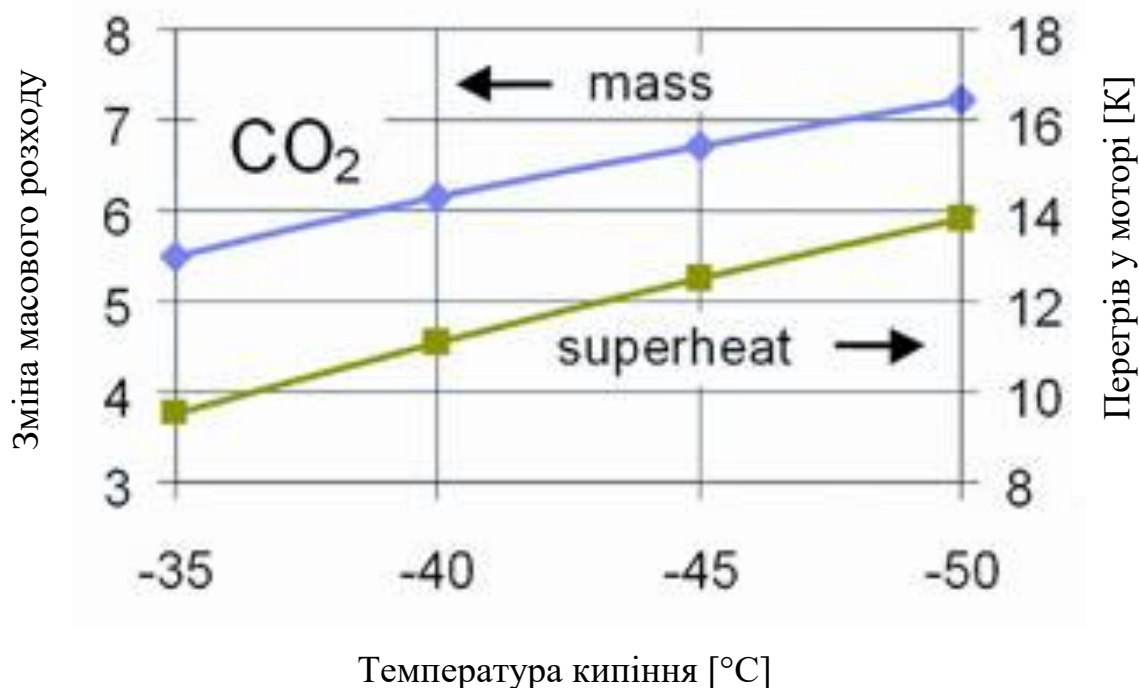


Рис.1.16 Зміна масової витрати CO<sub>2</sub> (%) залежно від значення перегріву всмоктуваного газу в моторі при різних температурах кипіння (SST, °C)

Кожна з обмоток мотора оснащується сполученими з електронним захисним пристроєм РТС - датчиками температури, що забезпечують надійний захист від перевантажень. За наявності достатнього охолодження мотор може працювати при дуже високих навантаженнях тривалий час.

#### 1.4 Аналіз останніх досліджень і публікацій.

До початку 1980-х років холодоагенти груп хлорофторвуглеців (ХФВ) і гідрохлорофторвуглеців (ГХФВ) займали домінуюче положення в холодильній промисловості та розглядалися як робочі речовини, яким притаманні тільки переваги порівняно з іншими холодоагентами. Проте з середини 1980-х років, коли вчені почали вивчати вплив ХФВ та ГХФВ на навколишнє середовище, ці холодоагенти стали предметом уваги у зв'язку з глобальними проблемами: парниковим ефектом та руйнуванням озонового шару Землі.

Двоокис вуглецю (вуглекислий газ, CO<sub>2</sub>, R744) – один з найбільш перспективних природних холодоагентів. Він не горить, не руйнує озоновий

шар, має низький потенціал глобального потепління (ПГП=1), але при цьому небезпечний для здоров'я в концентраціях, що перевищують 5% за об'ємом. R744 можна використовувати як робочу речовину в системах кондиціонування автомобілів і житлових приміщень, у теплових насосах, системах холодопостачання підприємств рітейлу та харчової індустрії, вендінг-торгівлі. CO<sub>2</sub> як холодоагент може використовуватися у холодильних системах різних типів, як субкритичних, так і транскритичних. У разі застосування CO<sub>2</sub> як холодоагенту для будь-яких типів холодильних систем необхідно враховувати як потрійну, так і критичну точку. За тиску 5,2 бар і температурі -56,6°C CO<sub>2</sub> досягає так званої потрійної точки. У цій точці всі три фази існують у рівноважному стані. За температури +31,1°C і тиску 73,6 бар CO<sub>2</sub> досягає своєї критичної точки. У цій точці густина CO<sub>2</sub> у рідинній і паровій фазі однакова. Отже, розходження між двома фазами 159 зникає, й CO<sub>2</sub> існує в транскритичній фазі, тобто CO<sub>2</sub> не може конденсуватися за температури вище 31°C. Властивості CO<sub>2</sub> дуже відрізняються від властивостей ГФВ. Основною проблемою для проектувальників є високий робочий тиск. Але з іншого боку, CO<sub>2</sub> притаманні високі термодинамічні показники та низькі втрати тиску, що дає можливість створення високоефективних холодильних систем. Найбільш широко CO<sub>2</sub> застосовується в каскадних системах, розроблених для промислових холодильних установок. Це обумовлено тим, що діапазон робочих тисків для цього випадку дозволяє використовувати стандартне обладнання (компресори, регулятори та клапани), наявне в продажі. Як правило, на високотемпературному боці використовуються холодоагенти HC, HFC або NH<sub>3</sub>, на низькотемпературному боці використовується CO<sub>2</sub>. Відмінною рисою холодильних систем, які працюють за транскритичним циклом на CO<sub>2</sub>, є те, що використовується тільки один холодоагент – CO<sub>2</sub>. Особливість транскритичної схеми в тому, що під час її роботи не відбувається конденсації холодоагенту, завдяки чому досягається мінімальна різниця між температурою навколишнього середовища та температурою холодильного агента, що використовується для перенесення тепла в системі рекуперації. Ця

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 32   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



властивість дає можливість збільшити кількість тепла, що рекуперується за умов збільшення температури навколишнього середовища. Порівняно з традиційними установками на ГФВ холодоагентах, у помірному кліматі застосування транскритичної системи дозволяє знизити річне енергоспоживання на 15–20%.

Низка компаній розробили та пропонують каскадні холодильні центральні на CO<sub>2</sub>, що використовуються для систем холодопостачання супермаркетів. Поршневі напівгерметичні компресори для CO<sub>2</sub> як холодоагенту як для субкритичного, так і для транскритичного циклів пропонують багато виробників, зокрема, такі як Danfoss, Bitzer, GEA Bock, Dorin SpA.

Розглянемо особливості роботи транскритичної холодильної системи, принципова схема якої зображена на рис. 1.17. У теплий період року, за температури навколишнього середовища ( $T_{nc}$ ) вище  $+25\text{--}27^{\circ}\text{C}$ , CO<sub>2</sub> що нагнітається в газоохолоджувач (2), не може бути сконденсований, тому що за таких умов холодоагент перебуває в транскритичному стані. Відповідно в теплообмінному апараті відбувається тільки охолодження транскритичного CO<sub>2</sub> до температури на  $3\text{--}5^{\circ}$  вище  $T_{nc}$ . Далі, після розширення у вентилі високого тиску (3), транскритичний CO<sub>2</sub> розділяється на два фазових стани: рідина та газ. «Надлишковий» газ, що утворився в ресивері (4), відправляється по байпасній лінії через пропускний вентиль (5) у лінію усмоктування високого тиску. В іншу пору року, коли температура навколишнього середовища ( $T_{nc}$ ) нижче  $+20^{\circ}\text{C}$ , CO<sub>2</sub> конденсується в газоохолоджувачі та в рідкому вигляді направляється в ресивер. На сьогодні найбільш широко розповсюджені транскритичні бустерні холодильні системи. Бустерною називається така система, в якій є дві стадії стиску одного холодоагенту: CO<sub>2</sub> нагнітається компресором низького тиску на порт усмоктування компресора високого тиску (1). У цій холодильній системі можна виділити 4 рівні проектних тисків (рис. 1.17). Секція високого тиску починається з компресора високого тиску (1), проходить через газоохолоджувач (2), а закінчується

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 33   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

вентилем регулювання високого тиску (3). Розрахунковий тиск у цій секції, як правило, становить від 90 до 120 бар, робочий від 45 до 100 бар.

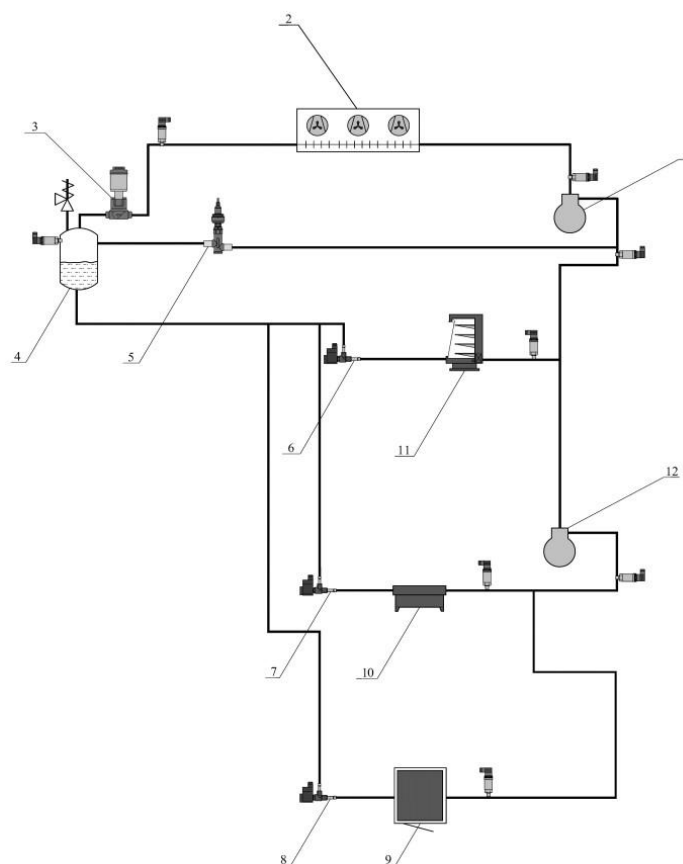


Рис. 1.17 Принципова схема транскритичної холодильної системи

Секція проміжного тиску, яка йде від вентиля високого тиску (3), де потік розділяється на газ і рідину в ресивері (4). Газоподібна фаза відводиться в усмоктувальну лінію компресора високого тиску через пропускний вентиль (5). Рідка фаза подається до розширювальних вентилів (6, 7, 8), де відбувається її розширення перед подачею в низькотемпературний (9, 10) і середньотемпературний (11) випарники.

Розрахунковий тиск у цій секції становить 90 бар (за умови, що не потрібне охолодження ресивера в разі простою холодильної системи) або 60 бар (за наявності допоміжної системи охолодження ресивера), робочий тиск від 30 до 40 бар.

Секція середнього тиску починається від середньотемпературного випарника (11) до сторони усмоктування середньотемпературного компресора (1). Граничний тиск 60 бар, робочий від 20 до 30 бар.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 34   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Секція низького тиску йде від низькотемпературних випарників (9, 10) до вентилів регулювання тиску й до сторони усмоктування низькотемпературного компресора (12). Як видно з рисунку, газ із низькотемпературних випарників стискується в низькотемпературному компресорі (12) і змішується з газами, що надходять із середньотемпературного випарника й байпасної лінії. Звідти газ подається в усмоктувальну лінію компресора високого тиску та заповнює контур. Граничний тиск 45 бар, робочий від 10 до 16 бар.

Як видно з наведеного вище, існують деякі відмінності та конструктивні особливості транскритичної бустерної холодильної системи на CO<sub>2</sub> порівняно з традиційними холодильними системами, що в першу чергу пов'язано з високим тиском у системі. Розглянемо детально конструктивні особливості основних елементів транскритичної бустерної холодильної системи.

Головною відмінністю транскритичної бустерної холодильної системи є теплообмінний апарат – газоохолоджувач, призначений для охолодження стислого до високого тиску холодильного агента.

Конструкція газоохолоджувача, порівняно з існуючими традиційними конденсаторами, набагато складніша, у тому числі через підвищений робочий тиск, (до 150 бар), що майже в 4 рази вище, та в 2 рази вищу температуру (+150°C) і має низку особливостей.

Корпус газоохолоджувача повинен бути виготовлений з високоміцних матеріалів, трубки для охолодження CO<sub>2</sub> з міді та оребрення з алюмінію здатні витримувати тиск системи 120 бар. У той же час газоохолоджувач може забезпечити значно більш високий рівень відведення теплоти та малу витрату повітря за відповідно більш низької потужності вентилятора. Зниження витрати повітря дає значні переваги з погляду зниження фронтальної площі оребрення та зменшення витрат енергії на вентилятори. Це дає можливість використовувати один вентилятор замість декількох, зменшити габарити (на 50%) за рахунок зменшення в 2 рази фронтального перетину та подвоєння

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 35   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

рядів трубок, при цьому поверхня теплообміну практично залишається незмінною, витрати енергії на вентилятори (на 66%) і рівень шуму (на 4,8 дБ). Особливо важливий внутрішній об'єм газоохолоджувача, тому що від нього залежить розмір ресивера. У газоохолоджувачі відбувається радикальна зміна середньої густини газу CO<sub>2</sub>, стан якого змінюється від транскритичного до субкритичного, визначаючи тим самим розмір ресивера.

У системах на CO<sub>2</sub> ресивер виконує ще й функцію віддільника рідини, де за допомогою сили тяжіння рідина відділяється від газу, у ньому підтримується певний рівень рідини, яка потім подається на випарники, а газ відсмоктується компресором.

Потік CO<sub>2</sub> подається у випарник або завдяки різниці тисків (системи з безпосереднім кипінням), або за допомогою насоса. Оскільки CO<sub>2</sub> має більш високі робочі тиски, чим більшість інших холодоагентів за відповідних температур, то це необхідно враховувати під час визначення робочого тиску системи на стадії проектування.

Тиск у ресивері повинен регулюватися клапаном із кроковим двигуном та бути вище величини, за якої відбувається випаровування в середньотемпературних випарниках, для забезпечення різниці тисків на середньотемпературному розширювальному клапані. З іншого боку, цей тиск повинен бути нижче величини, закладеної під час проектування.

Ще однією вагомою конструктивною відміною є необхідність підтримання проміжного тиску в ресивері транскритичної холодильної системи в разі простою.

Для більшості холодильних установок, що працюють на традиційних холодоагентах, зупинка не веде за собою підвищення максимального робочого значення тиску для компонентів системи. Для системи на CO<sub>2</sub> тиск під час простоювання може досягати величини 65–80 бар (що відповідає температурі 25–30°C). Це перевищує величину максимального робочого тиску більшості компонентів системи та вимагає додаткових заходів для зниження та підтримання тиску.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 36   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Існує два головних фактори, які визначають тиск  $\text{CO}_2$  під час простоювання: температура навколишнього середовища, ступінь заправлення системи.

Поки  $\text{CO}_2$  перебуває у вигляді рідини, тиск у системі буде дорівнювати тиску насичення, відповідаючи навколишній температурі (наприклад, якщо навколишня температура дорівнює  $20^\circ\text{C}$ , тиск відповідно буде приблизно 57 бар).

Якщо  $\text{CO}_2$  перебуває у вигляді газу, то його тиск є ненасиченим і росте повільніше, хоча величина цього тиску буде вища, ніж у традиційних холодоагентів за тих самих умов. Наприклад, якщо весь рідкий  $\text{CO}_2$  перетвориться на газ за температури  $0^\circ\text{C}$ , то відповідно його тиск буде дорівнювати 34,8 бар. Якщо потім навколишня температура зросте до  $30^\circ\text{C}$ , то величина тиску збільшиться тільки до 42,5 бар. Цей принцип може бути використаний для обмеження росту тиску в системі за умови заправлення обмеженої кількості холодоагенту, а для підтримання прийнятного рівня тиску необхідно передбачити додатковий окремий розширювальний ресивер для  $\text{CO}_2$ .

Коли тиск у системі збільшиться, холодоагент  $\text{CO}_2$  пропускається в цей ресивер через спеціальний клапан. Головна умова – досить великі розміри розширювального ресивера, щоб прийняти кількість холодоагенту, достатню для підтримання постійного тиску в іншій частині системи. При запуску системи газ  $\text{CO}_2$  повертається в усмоктувальну лінію через регулятор тиску, на якому встановлений спеціальний регулювальний пристрій.

Найбільш поширеними заходами для підтримання тиску під час зупинки транскритичної холодильної установки є допоміжна система охолодження ресивера та часткове викидання  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

За збільшення тиску в системі невелика кількість  $\text{CO}_2$  може бути видалена в атмосферу, перш ніж він досягне гранично допустимої величини, передбаченої

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 37   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

проектом. При цьому відбувається охолодження рідкого CO<sub>2</sub>, що залишився в ресивері, завдяки закипанню.

Для комерційних холодильних систем (наприклад, систем супермаркетів або гіпермаркетів, розподільних складів тощо) для охолодження ресивера холодоагенту CO<sub>2</sub> використовується окремий компресорно-конденсаторний агрегат невеликої холодопродуктивності. Коли тиск у системі, що простоє, починає зростати, запускається допоміжна холодильна установка для охолодження ресивера з холодоагентом CO<sub>2</sub>, тим самим не даючи тиску перевищити максимально допустимий рівень.

Випарники транскритичних холодильних установок не зазнають дії особливо високих тисків. Звичайно максимальний робочий тиск знаходиться в межах 45–60 бар. Такий тиск не вимагає спеціальної конструкції випарника, а тільки деякого коректування товщини та діаметра труб. Завдяки ефективності CO<sub>2</sub> розміри трубопроводів установок можуть бути істотно зменшені. Звичайно діаметр становить від 3/8” до 5/8”, і для забезпечення необхідної продуктивності можна використовувати випарники менших розмірів.

Бустерні системи вимагають особливої конструкції трубопроводів для того, щоб компресор низького ступеня зміг стиснути холодоагент і подати його на усмоктування компресора високого ступеня, заощаджуючи енергію та роботу.

Розміри компонентів (труб, трубопровідної арматури та елементів автоматики) на газових лініях у холодильних установках на CO<sub>2</sub> менше порівняно з установками на традиційних холодоагентах, компоненти рідинних ліній не відрізняються за розмірами. Наприклад, для установки холодопродуктивністю 250 кВт за температури кипіння -40°C діаметр усмоктувальної труби на аміаку складає 125 мм, а на CO<sub>2</sub> – 65 мм. При цьому діаметри труб рідкого холодоагенту після лінійного ресивера будуть відповідно 32 і 65 мм.

Особливої уваги заслуговує питання запобігання потраплянню вологи в холодильну систему. Волога в системах із CO<sub>2</sub> може створювати досить

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 38   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

серйозні проблеми. У разі взаємодії із CO<sub>2</sub> волога утворює вугільну кислоту, яка піддає корозії трубопроводи. Незважаючи на те, що тиск у системах із CO<sub>2</sub> набагато вище атмосферного, волога може проникати усередину одним із таких способів:

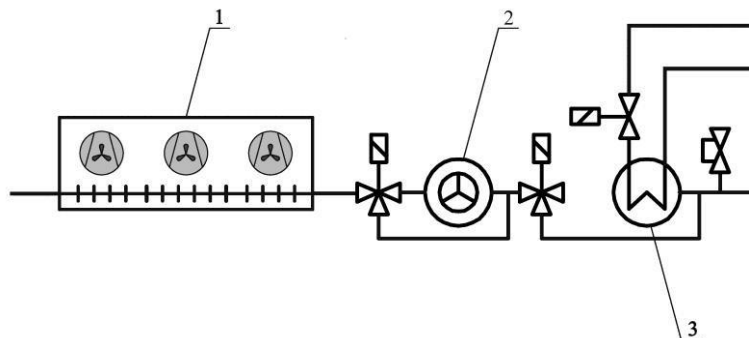
- разом із холодоагентом під час заправлення (залежить від ступеня сухості CO<sub>2</sub>);
- через сальники за рахунок різниці парціального тиску;
- під час заміни вставок фільтрів. Це особливо важливо враховувати, адже CO<sub>2</sub> вважається безпечним холодоагентом, тому під час проведення робіт із технічного обслуговування не передбачені суворі заходи безпеки;
- під час заправлення мастила в компресор.

Максимально припустима кількість вологи в системі CO<sub>2</sub> менша, ніж у системах з іншими традиційними холодоагентами. Якщо вміст вологи перевищить точку роси, і температура в системі буде нижче 0°C, волога буде замерзати, що приведе до ускладнень (зокрема, будуть забиватися пілотні канали регулюючих приладів, наприклад клапанів). Вода легко може бути вилучена із системи за допомогою стандартних адсорбційних фільтрів осушувачів, ефективність роботи яких на CO<sub>2</sub> дуже висока. Для контролю вологості також можна застосовувати стандартні оглядові стекла, розраховані на більш високий робочий тиск.

Необхідно відзначити ще одну важливу конструктивну особливість – можливість у транскритичних системах на CO<sub>2</sub> ефективно використовувати рекуперацію теплоти для одержання гарячої води для технологічних потреб і підігрівання теплоносія для опалення. На відміну від фреонових машин, де є проблеми, пов'язані з одержанням високопотенційної теплоти, на холодильних машинах, що працюють у транскритичному циклі на CO<sub>2</sub>, таких проблем немає. Уся теплота є високо потенційною, тому фактично можна використовувати весь перегрів, відключаючи, за необхідності, газоохолоджувач.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 39   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Конструктивно це може бути реалізовано таким чином: перед газоохолоджувачем на лінії високого тиску встановлюють один або два теплообмінних апарати для відведення теплоти (рис. 1.18).



*Рис. 1.18. Варіант конструктивної реалізації рекуперації теплоти: 1 – газоохолоджувач; 2 – теплообмінник повітряний; 3 – теплообмінник водяний*

Триходові клапани направляють CO<sub>2</sub>, що нагнітається компресорами у теплообмінники відповідно до потреби в опаленні та гарячому водопостачанні. Надлишкове тепло направляється в газоохолоджувач.

### 1.5 Застосування CO<sub>2</sub> як холодоагенту в холодильних системах супермаркетів

За останні роки перспективність CO<sub>2</sub> як холодоагенту помітно зростає. Діоксид вуглецю - один з небагатьох хладагентів для холодильних систем, актуальний з точки зору ефективності застосування і безпеки для навколишнього середовища. Застосування традиційних холодоагентів обмежується різними нормативами, причому в усьому світі спостерігається тенденція до їх посилення. У зв'язку з цим природні холодоагенти знаходять все більше застосування. Ми починаємо рубрику, присвячену використанню холодоагенту CO<sub>2</sub> в області штучного холоду.

Холодоагент CO<sub>2</sub> належить до групи так званих природних холодоагентів (аміак, пропан, бутан, вода і ін.) Має нульовий потенціал руйнування озонowego шару Землі (ODP = 0) і є еталонною одиницею при

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 40   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



розрахунку потенціалу глобального потепління ( $GWP = 1$ ). У кожного з природних холодоагентів є свої недоліки, наприклад, аміак токсичний, пропан горючий, а у води обмежена область застосування. На відміну від них  $CO_2$  не токсичний і не горючий, хоча його вплив на навколишнє середовище не є однозначним. З одного боку,  $CO_2$  міститься в навколишньому повітрі і необхідний для протікання життєвих процесів. З іншого боку, вважається, що більша концентрація вуглекислоти в повітрі є однією з причин глобального потепління.

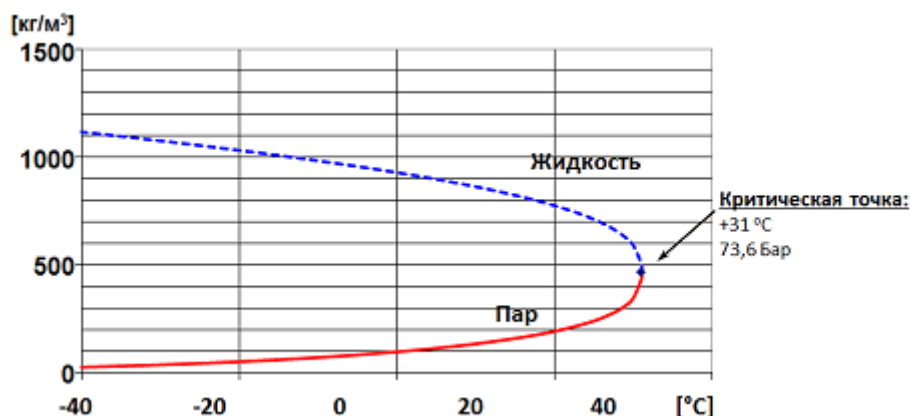
Ініціатива повернутися до використання  $CO_2$  в холодильній техніці належить скандинавським країнам, де закони значно обмежують використання холодоагентів HFC та HCFC. В якості холодоагенту для промислових установок традиційно застосовується аміак, але його кількість в системі обмежена. Це не є проблемою для установок, що працюють на високі і середні температури (до  $-15 / -25^{\circ}C$ ), де кількість аміаку скорочується застосуванням вторинного хладоносителя. Для більш низьких температур застосування вторинного хладоносителя неефективно через великі втрати на різниці температур, в цьому випадку використовують  $CO_2$ .



Рис. 1.19. Фазова діаграма  $CO_2$

На малюнку вище приведена фазову діаграму  $CO_2$ . Криві лінії, які розділяють діаграму на окремі ділянки, визначають граничні значення тисків і температур для різних фаз: рідкої, твердої, парової або надкритичної. Точки на цих кривих визначають тиску і відповідні їм температури, при яких дві фази

знаходяться в рівноважному стані, наприклад, тверда і парова, рідка і парова, тверда і рідка.



При атмосферному тиску CO<sub>2</sub> існує в твердій або паровій фазах. При такому тиску рідка фаза не існує. При температурах нижче -78,4 ° С діоксид вуглецю знаходиться в твердій фазі ( «сухий лід»). При підвищенні температури CO<sub>2</sub> сублімує в парову фазу. При тиску 5,2 бар і температурі - 56,6 ° С холодоагент досягає, так званої, потрійний точки. У цій точці всі три фази існують в рівноважному стані. При температурі + 31,1 ° С CO<sub>2</sub> досягає своєї критичної точки, де його щільності в рідинної і паровій фазі однакові (малюнок вище). Отже, відмінність між двома фазами зникає і CO<sub>2</sub> існує в сверхкритическом стані.



Рис. 1.20 Транскритичний цикл

Діоксид вуглецю може використовуватися в якості холодоагенту в холодильних системах різних типів, як субкритичних, так і транскритических. При використанні CO<sub>2</sub> в якості холодоагенту необхідно враховувати як

|     |      |          |        |      |      |
|-----|------|----------|--------|------|------|
|     |      |          |        |      | Арк. |
|     |      |          |        |      | 42   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |      |

потрійну, так і критичну точку для будь-яких типів холодильних систем. У субкритичного циклі CO<sub>2</sub> (малюнок вище) весь діапазон робочих температур і тисків лежить між критичною і потрійною точками. Одноступінчаті холодильні цикли CO<sub>2</sub> аналогічні іншим холодоагентів, але мають деякі несприятливі чинники, пов'язані в першу чергу з обмеженням значень температур і тисків.

Транскритическіе холодильні системи на CO<sub>2</sub> в даний час використовуються в невеликих і комерційних холодильних установках, а саме: в мобільних системах кондиціонування повітря, невеликих теплових насосах і системах охолодження супермаркетів. Транскритическіе системи практично не застосовуються в промислових холодильних установках. Робочий тиск в субкритичного циклі зазвичай знаходиться в діапазоні від 5,7 до 35 бар при відповідній температурі від -55 до 0 ° С. При відтаванні випарника гарячим газом значення робочого тиску збільшується приблизно на 10 бар.

Найбільш широко CO<sub>2</sub> застосовується в каскадних системах промислових холодильних установок. Це обумовлено тим, що діапазон робочих тисків дозволяє використовувати стандартне обладнання (компресори, Регулятори й редуктори).

Існують різні види каскадних холодильних систем на CO<sub>2</sub>: системи з безпосереднім кипінням, системи з насосною циркуляцією, системи на CO<sub>2</sub> із вторинним ропні контуром або комбінації цих систем.

## 1.6 Приклади комерційних холодильних систем на CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> може використовуватися в якості холодоагенту в системах як з субкритичного, так і з транскритическім холодильним циклом.

У класичному субкритичного холодильному циклі, який традиційно використовується, наприклад, в більшості холодильних систем на фреонах, весь діапазон робочих температур і тисків знаходиться нижче критичної точки і вище потрійної точки. Подібні системи на CO<sub>2</sub> характеризуються простотою конструкції, обмеженим діапазоном робочих температур і високим тиском.

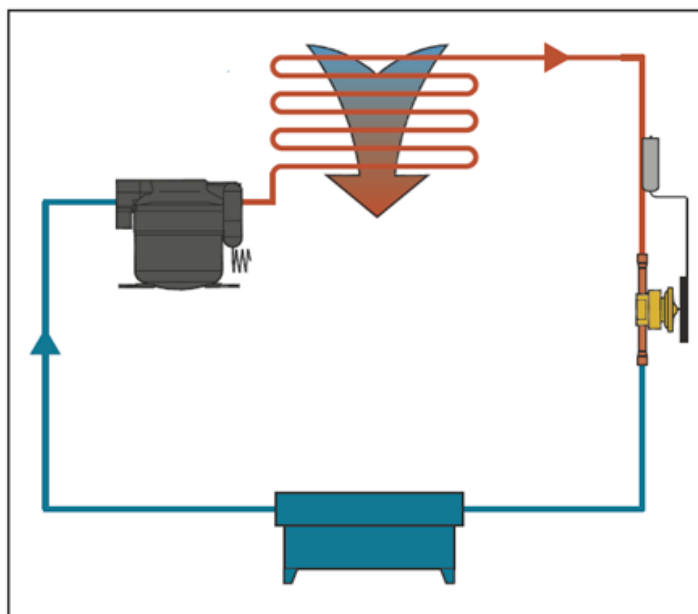
|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 43   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Робочий тиск в субкритичного циклі знаходиться зазвичай в діапазоні від 5,7 до 35 бар при відповідній температурі від -55 до 0 ° С. Якщо випарник оттаївається гарячим газом, то значення робочого тиску збільшується приблизно на 10 бар.

Відмітна риса холодильних систем, що використовують транскритическій цикл охолодження, відсутність в конструкції конденсатора. Замість нього використовується газоохолоджувач.

Це пов'язано з тим, що відведення тепла від холодоагенту в транскритическом циклі відбувається при температурі, що перевищує критичну точку, так що конденсації при цьому не відбувається.

Так як фазовий перехід не здійснюється, при проходженні через газоохолоджувач температура CO<sub>2</sub> продовжує знижуватися. Теплоємність CO<sub>2</sub> при охолодженні також змінюється. Різниця температур між охолоджуючим середовищем і CO<sub>2</sub> в газоохолоджувачі зазвичай становить половину аналогічної різниці температур при конденсації холодоагенту. Щоб домогтися максимальної продуктивності, газоохолоджувач виконують у вигляді теплообмінника противоточного типу.



1.21 Схема найпростішої холодильної установки, що працює в транскритичному режимі

Найпростіша транскрітіческая установка складається з компресора, газоохолоджувача, випарника і розширювального пристрою (дросельного отвору або капілярної трубки). У найпростіших установках немає регуляторів тиску, і вони, отже, працюють при оптимальному високому тиску і максимальної продуктивності при даних незмінних умовах роботи. Іншим варіантом є використання термостатичного клапана для регулювання температури охолодження газу.

Однією з найбільш перспективних для застосування в холодному кліматі є транскрітіческая бустерна система. Вона економічніша в порівнянні з системами, що працюють на фреоні R404a, і в той же час відрізняється простотою конструкції.

Типова транскрітіческая углекислотная бустерна система поділяється на три секції: високого, середнього та низького тиску.

Секція високого тиску починається з компресора високого тиску, проходить через газоохолоджувач і теплообмінник на всмоктуючої лінії, а закінчується клапаном регулювання високого тиску. Розрахунковий тиск в цій секції, як правило, становить від 90 до 120 бар.

Секція середнього тиску починається від розширювального клапана високого тиску, де потік розділяється на газ і рідина в ресівері.

Газоподібна фаза відводиться у всмоктувальну лінію компресора високого тиску через перепускний клапан. Рідка фаза подається до розширювальним клапанів, де відбувається її розширення перед подачею в низькотемпературний і середньотемпературна випарники.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 45   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

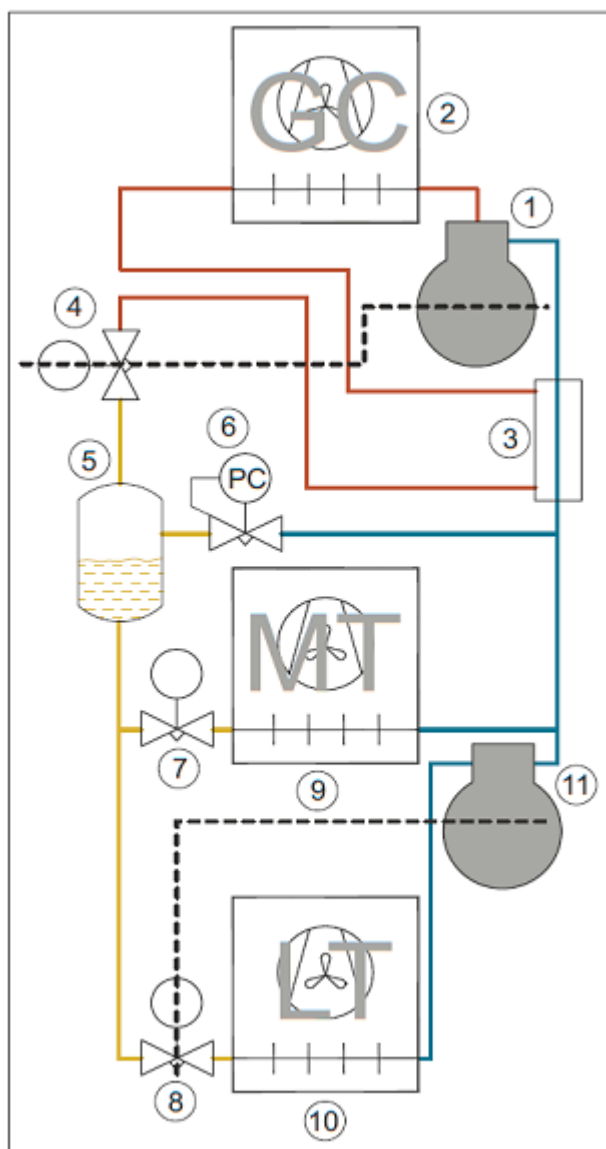


Рис. 1.22 Схема транскритичної бустерної системи з газовим перепускним клапаном

Газ з низькотемпературного випарника стискається в низькотемпературному компресорі і змішується з газами, які надходять з середнетемпературного випарника і перепускний лінії. Звідси газ подається у всмоктувальну лінію компресора високого тиску і заповнює контур.

Розрахунковий тиск в середнетемпературній секції зазвичай становить 40-45 бар, а в низькотемпературній секції - 25 бар. При цьому все частіше середнетемпературна і низькотемпературна секції розраховуються на однаковий тиск.

Найбільш широко CO<sub>2</sub> застосовується в каскадних системах. В цьому випадку діапазон робочих тисків дозволяє використовувати стандартне обладнання (компресори, Регулятори й редуктори), доступний у продажу.

Існують різні види каскадних холодильних систем на CO<sub>2</sub>: з безпосереднім кипінням, з насосною циркуляцією, з вторинним ропні контуром, а також комбінації цих систем. Каскадна система складається з двох ізольованих холодильних контурів, сполучених через каскадний теплообмінник. В даний час поширення набули системи, в яких в якості холодоагенту на низькотемпературної стороні використовується CO<sub>2</sub>, а на високотемпературної стороні - вуглеводні, гідрофторвуглеці (ДФУ) або аміак. Високотемпературного холодоагенту для каскадної системи потрібно дуже небагато (значно менше в порівнянні зі звичайною системою аналогічної продуктивності на тому ж хладагенте).

При цьому робочий тиск CO<sub>2</sub> в каскадних системах зазвичай невисока - 40-45 бар, що відповідає температурі від +5 до + 10 ° С, а різниця температур у каскадного теплообмінника - відносно низька. Такі пристрої особливо ефективні в умовах жаркого клімату.

Потік CO<sub>2</sub> в низькотемпературному контурі каскадної системи подається у випарник або завдяки різниці тисків, або за допомогою насоса.

Система з безпосереднім кипінням холодоагенту є більш простий, так як в ній відсутній насос і пристрої контролю рівня рідини. Така система має також меншу заправку холодоагентом. Недоліком даної схеми є знижена ефективність через більш високого перегріву на всмоктуванні.

Тому така схема зазвичай використовується в невеликих холодильних установках.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 47   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

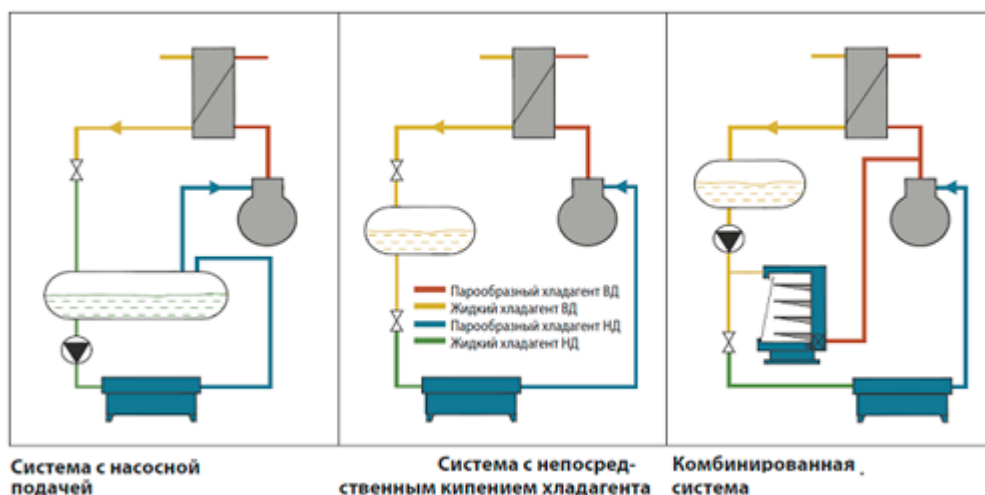


Рис. 1.23. Разные виды компоновки каскадных систем

Каскадные системы на CO<sub>2</sub> с насосной подачей отличаются высокой эффективностью, а небольшой размер трубопроводов, используемый как в низкотемпературных, так и в среднетемпературных применениях, делает эти установки уникальными в сравнении с раздельными системами.

Лучшим применением схемы с насосной циркуляцией являются установки с относительно высокой производительностью. В установках с небольшой или переменной производительностью управление насосами сложно.

### 1.7 Повышение эффективности холодильной системы в магазинном строительстве

Опыт реализации транскритической установки на диоксиде углерода в магазине сети METRO.

В настоящее время, в условиях повышенной конкуренции, сети магазинов розничной торговли продуктами питания все больше уделяют внимания снижению эксплуатационных затрат. Также большое внимание уделяется сроку окупаемости тех или иных энергосберегающих технологий и решений в сетевом ритейле.



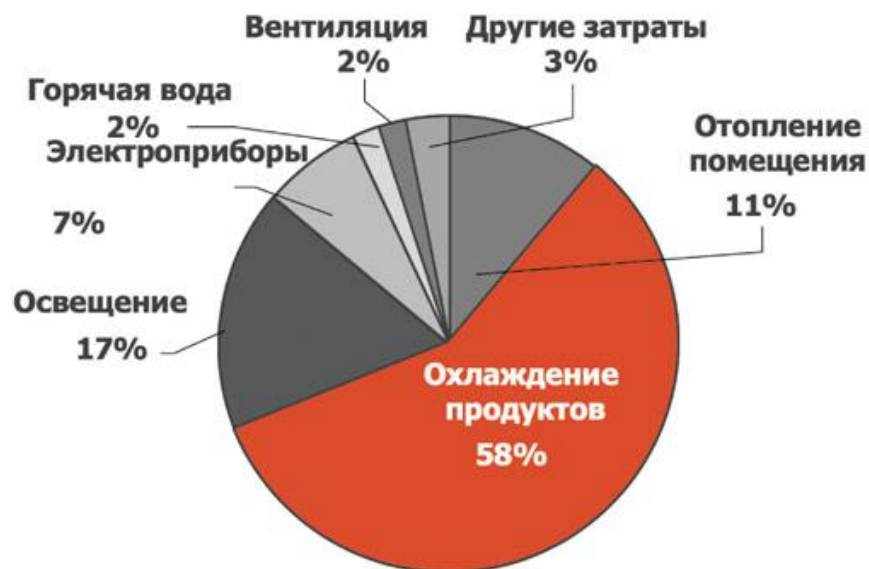


Рис 1.24 Розподіл енерговитрат магазину

Підвищення ефективності роботи холодильного обладнання - одна з найбільш важливих завдань для технічних служб мережі. Є багато різних енергоефективних рішень для фреонових систем, і російські мережі магазинів успішно їх застосовують. Серед таких технологій - адаптивні алгоритми управління перегрівом на испарителях, тиском кипіння і конденсації; плавне регулювання продуктивністю компресорів і конденсаторів.

Більш кардинальним способом комплексного зниження експлуатаційних витрат є перехід підприємств торгівлі на застосування природних холодоагентів, в першу чергу діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>). Це стає все більш актуальним і в зв'язку з прийняттям міжнародних правил по боротьбі з глобальним потеплінням. Найбільш значущою подією в цьому напрямку для Росії стало набуття чинності з 1 січня 2019 р Кігалійской поправки до Монреальського протоколу. Відповідно до цієї поправки Росія повинна забезпечити зниження рівня споживання ГФУ-хладагентів на 35% починаючи з 2025-го, а починаючи з 2036 р, воно повинно знизитися на 85%.

Таким чином, вже сьогодні набуло актуальності питання вибору альтернативних схемних рішень, оптимальних з точки зору безпеки, екології, надійності, капітальних і експлуатаційних витрат. Транскритическая холодильная установка, як одне з рішень, відповідних зазначеним вище

критеріям, вже досить добре зарекомендувала себе в Європі, де на цей момент працює понад 14 тис «екологічно чистих» систем. Таке поширення подібні системи отримали почасти через більш жорсткого законодавства в плані відмови від ГФУ-хладагентів.

З огляду на зазначені вище фактори, деякі російські компанії заздалегідь почали тестувати і освоювати CO<sub>2</sub>-технології. Завдяки цьому в Росії вже є приклади успішної реалізації проектів магазинів з транскритическімі системами. Мережа Metro Cash & Carry однією з перших прийняла рішення про планомірне переведення своїх магазинів на діоксид вуглецю. Перші магазини мережі, оснащені такими системами, стали працювати в 2018 р.

Особливістю даного проекту є наявність системи використання теплоти, що відбирається від холодоагенту. Відмінною рисою транскритического холодильного циклу є можливість отримувати значно більше тепла, в порівнянні з фреоновим циклом, не наводячи при цьому до підвищення існуючих показників споживання електроенергії. В даному магазині тепло використовується для отримання гарячої води і нагрівання води для системи вентиляції (рис.1.25).



Рис 1.25. Транскритична схема на діоксиді вуглецю для Metro Cash & Carry

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 50   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Використовуваний бустерний компресорний агрегат, розроблений для забезпечення трьох температурних рівнів:

- низькотемпературні вітрини і камери;
- середньотемпературні вітрини і камери;
- охолодження виробничих і торгових приміщень.

Холодильна машина з використанням среднетемпературних і паралельних компресорів транскритического стиснення, а також низькотемпературних бустерних компресорів загальної холодильної потужністю 542 кВт дає максимальний ефект в частині зниження енергоспоживання.

Для охолодження холодоносія, що подається в повітроохолоджувачі виробничих приміщень в літній час, використовується парожидкостная суміш холодоагенту після клапана високого тиску, а в зимовий період охолодження відбувається повністю за рахунок фрікулінга. Таким чином досягається економія енергоресурсів.

Автоматизація холодильної установки, побудована на базі контролерів Danfoss, з функціями, спеціально розробленими для управління системами на CO<sub>2</sub> і доповненими алгоритмами власної розробки компанії «Ленд», забезпечує максимально стабільну роботу обладнання і дозволяє замовнику не турбується про збереження продукту при будь-яких зовнішніх змінах. У систему управління входять контролери:

- АК-РС 781А - комплексне управління компресорним агрегатом і газоохолоджувач в режимі оптимального енергоспоживання;
- АК-СС 550А - комплексне управління воздухоохладителями вітрин і камер із застосуванням автоматичних адаптивних функцій для підвищення ефективності роботи охолоджувальних приладів;
- МСГ - програмований контролер з унікальними алгоритмами для управління системою утилізації тепла і організації охолодження виробничих приміщень.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 51   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Головним контролером магазину є АК-SM 850, який відповідає за збір і аналіз даних від окремих контролерів для реалізації централізованих енергозберігаючих та координуючих алгоритмів, а також забезпечення допоміжних функцій, необхідних для зручності експлуатації системи. Будь-які відхилення від заданого режиму роботи відстежуються фахівцями компанії «Ленд» за допомогою віддаленого контролю, що дозволяє сервісній служби максимально оперативно реагувати на виникаючі проблеми.

Компресорні агрегати, станції рекуперації та насосні станції для хладоносителя були зібрані на російському заводі Elementum на базі компресорів Dorin (рис.1.26 і 1.27).



Рис. 1.28 Компресорний агрегат виробництва Elementum для проекту Metro, Солнцево.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 52   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



Рис. 1.29. Система управління транскритической установкою Metro

Монтажні та пусконаладжувальні роботи виконані компанією «Ленд», яка має багатий досвід роботи з діоксидом вуглецю в тому числі і в розрізі транскритических систем.

Згідно з вимогами замовника, перша система рекуперації теплоти, розрахована для потреб гарячого водопостачання, виробляє 75 кВт тепла з витратою 31,2 м<sup>3</sup> / добу гарячої води з температурами 15/65 °С. Друга система працює на опалення і виробляє 220 кВт тепла з витратою 312 м<sup>3</sup> / добу і температурним режимом 27 / 42°С. Використання теплоти, що відбирається від холодоагенту, дозволить знизити річне енергоспоживання майже на 80% в порівнянні з варіантом нагрівання води ТЕНами. Наявність системи рекуперації не дозволяє знижувати тиск в газоохолоджувачі до мінімальних значень в зимовий та осінньо-весняний період, що призводить до деякого перевитрати електроенергії. Але навіть в цьому випадку очікується, що транскритическая система буде ефективніше фреонової приблизно на 40% за інших рівних умов (враховуючи, що в разі застосування фреону потрібно догрів води, наприклад, електричними ТЕНами).

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 53   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |





Рис. 1.30 Насосна станція хладоносителя для виробничих приміщень

### Висновок

Сьогодні очевидно, що транскритичні технології дозволяють підвищити рівень ефективності системи, забезпечуючи при цьому прийнятний термін окупності. Використання CO<sub>2</sub> в якості холодинного хгента дозволяє знизити негативний вплив синтетичних холодинних агентів на навколишнє середовище.

## РОЗДІЛ II. Розрахункова частина

### 2.1 Вихідні дані для розрахунку системи на CO<sub>2</sub>

Традиційно для систем холодопостачання торговельних підприємств застосовувалися два різновиди циклів холодильних установок - цикл одноступінчатого стиснення і цикл з економайзером, який значно поступається за поширеністю.

В якості холодоагенту раніше застосовувалися R12 і R22, а після їх заборони - R404A і R507A. Однак, з жорсткістю законодавства в галузі охорони навколишнього середовища, виникла необхідність застосування нових холодоагентів, одним з яких є R744.

Особливістю супермаркету є наявність споживачів холоду на двох температурних рівнях - низькотемпературному (НТ, розрахункова температура кипіння -35 ° С) і середнетемпературному (СТ, розрахункова температура кипіння -10 ° С). Традиційно для холодопостачання цих споживачів застосовувалися індивідуальні холодильні установки (ХУ), що істотно відрізняє їх від систем, які проектуються єдиної холодильною системою для двох температурних рівнів.

Основні залежності для розрахунку в цьому випадку будуть приймати вигляд:

- питома масова холодопродуктивність

$$q_0^{\text{обш}} = q_0^{\text{СТ}} \times g_{\text{СТ}} + q_0^{\text{НТ}} \times g_{\text{НТ}} \quad (2.1)$$

- мінімальна необхідна питома робота (електроенергія) для генерації холоду

$$l_{\text{min}}^{\text{обш}} = l_{\text{min}}^{\text{СТ}} \times g_{\text{СТ}} + l_{\text{min}}^{\text{НТ}} \times g_{\text{НТ}} \quad (2.2)$$

- адіабатне робота стиснення

$$l_{\text{ад}}^{\text{обш}} = l_{\text{ад}}^{\text{СТ}} \times g_{\text{СТ}} + l_{\text{ад}}^{\text{НТ}} \times g_{\text{НТ}} \quad (2.3)$$

- дійсна витрачається питома робота стиснення

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 55   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

$$l_{\text{сж}}^{\text{общ}} = l_{\text{сж}}^{\text{ст}} \times g_{\text{ст}} + l_{\text{сж}}^{\text{нт}} \times g_{\text{нт}} \quad (2.4)$$

- ступінь термодинамічної досконалості

$$\eta_{\text{терм}}^{\text{общ}} = \frac{l_{\text{min}}^{\text{общ}}}{l_{\text{сж}}^{\text{общ}}} \quad (2.5)$$

- холодильний коефіцієнт при адіабатні процесі стиснення

$$\varepsilon_{\text{ад}}^{\text{общ}} = \frac{q_0^{\text{общ}}}{l_{\text{ад}}^{\text{общ}}} \quad (2.6)$$

- дійсне значення холодильного коефіцієнта

$$\varepsilon_{\text{д}}^{\text{общ}} = \frac{q_0^{\text{общ}}}{l_{\text{сж}}^{\text{общ}}} \quad (2.7)$$

де  $g_{\text{нт}}$  и  $g_{\text{ст}}$  – питомі масові витрати в низькотемпературному і середнетемпературном контурах відповідно.

В якості вихідних даних використовуються параметри, прийняті при проектуванні:

- Температура кипіння середнетемпературних (СТ) споживачів - мінус 10 ° С;
- Температура кипіння низькотемпературних (НТ) споживачів - мінус 35 ° С;
- Температура навколишнього середовища - плюс 32 ° С;
- Температура повітря в середнетемпературних споживачах - 0 ° С;
- Температура повітря в низькотемпературних споживачів - мінус 20 ° С;
- Охолодження середнетемпературного контуру - 360 кВт;
- Охолодження низькотемпературного контуру - 70 кВт.

Адіабатні ККД компресорів приймалися на основі статистичних даних заводів-виробників подібного обладнання.

Однією з особливостей CO<sub>2</sub> є висока температура нагнітання, тому доцільно проектувати єдину холодильну систему з «корисними»

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 56   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



навантаженнями на рівні низького і середнього тиску. Вихідні дані для аналізу циклів CO<sub>2</sub> показані в табл. 2.1.

Були розглянуті та розраховані такі схеми холодопостачання:

- Холодильна система з CO<sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклу (система 1);
- Холодильна система з CO<sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклу з паралельним стисненням (система 2);
- Холодильна система з CO<sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклу з паралельним стисненням і ежектором (система 3);
- Каскадна холодильна система: CO<sub>2</sub> – нижня гілка каскаду, що працює по субкритичного циклу; R134a - верхня гілка (система 4).

Таблиця 2.1

Вихідні дані для аналізу циклів на CO<sub>2</sub>

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| Тиск кипіння НТ, бар (абс)                                      | 12,05     |
| Температура кипіння НТ, °С (К)                                  | -35 (238) |
| Тиск кипіння СТ, бар (абс)                                      | 26,5      |
| Температура кипіння СТ, °С (К)                                  | -10 (263) |
| Тиск нагнітання 2 ступені, бар(абс)                             | 91,0      |
| Тиск в проміжному посудині, бар (абс)                           | 34,8      |
| Температура навколишнього середовища, °С (К)                    | +32 (305) |
| Температура в споживачах НТ, °С (К)                             | -20 (253) |
| Температура в споживачах СТ, °С (К)                             | 0 (273)   |
| Охолодження низькотемпературного контуру Q <sub>нт</sub> , кВт  | 70        |
| Охолодження середнетемпературного контуру Q <sub>ст</sub> , кВт | 360       |
| Ступінь стиснення низькотемпературного контуру                  | 2,83      |
| Ступінь стиснення середнетемпературного контуру                 | 3,43      |
| Адіабатний ККД першого ступеня стиснення $\eta_{ад1}$           | 0,6       |

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| Адіабатний ККД другого ступеня стиснення $\eta_{ад2}$ | 0,65 |
| Адіабатний ККД паралельного стиснення $\eta_{адпар}$  | 0,68 |

## 2.2. Результати розрахунку холодильної системи з CO<sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклі

Оскільки транскритичні цикли з CO<sub>2</sub> (Рис. 2.1, 2.2) для є досить новими, наведемо опис його роботи.

Пари холодоагенту, що утворилися при кипінні -35 ° С в випарнику Вип<sub>НТ</sub> від теплового навантаження  $Q_{НТ}$ , стискаються компресором нижній сходинці КМ1 від тиску точки 1 до тиску точки 2. Змішуються з парами холодоагенту, що утворилися при кипінні холодоагенту на рівні -10 ° С в випарнику Іст від теплового навантаження  $Q_{ст}$ , і парами, що утворилися при дроселювання РВ4 від точки 8 до точки 10, після цього відбувається стиснення в компресорі другого ступеня КМ2 від тиску точки 3 до тиску точки 4.

Після цього пари потрапляють в охолоджувач газу ОГ, де охолоджуються від температури нагнітання до температури, що перевищує температуру навколишнього середовища на величину недорекуперації. Процес відбувається в сверхкритической області.

Охолоджені пари дроселірующие в РВ3 до тиску проміжного судини ПС (34,8 бар абс.), Частина парів відкачується компресором через дросельний вентиль РВ4, ентальпія решти при цьому знижується до стану точки 7.

Далі насичена рідина точки 7 дроселірується до середнетемпературного і низькотемпературного рівнів в РВ2 і РВ1 відповідно. Цикл повторюється. Даний цикл можна назвати базовим, оскільки, як буде видно нижче, наступні 2 циклу представляють його модифікацію з метою зменшення енергетичних втрат.

Зробимо розрахунок і аналіз базового транскритического циклу CO<sub>2</sub>

Питома масова холодопродуктивність середнетемпературного контуру:

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 58   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

$$q_{0\_ст} = h_{12} - h_9 \quad (2.8)$$

Питома масова холодопродуктивність низькотемпературного контуру:

$$q_{0\_нт} = h_{11} - h_1 \quad (2.9)$$

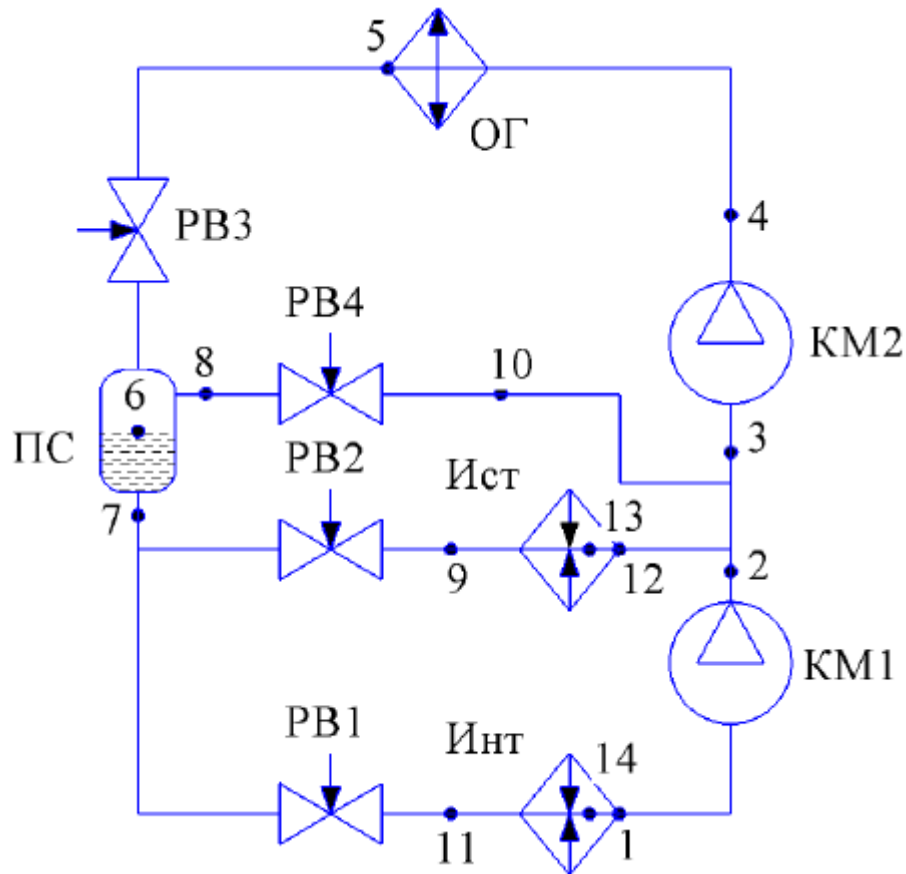


Рис. 2.1. Принципова схема транскритичної холодильної системи CO<sub>2</sub> (Система 1): KM1 – компресор першого ступеня стиснення, KM2 – компресор другого ступеня стиснення, ОГ – охолоджувач газу, ПС – проміжний посудину, Вип<sub>ст</sub> – випарник середнетемпературних споживачів, Вип<sub>нт</sub> – випарник низькотемпературних споживачів, PB1, PB2, PB3, PB4 – регулюючі вентилі.

Відносні масові витрати низькотемпературного і середнетемпературного контурів:

$$g_{HT} = 1$$

$$g_{CT} = \frac{G_{CT}}{G_{HT}} = 5,1 \quad (2.10)$$

Відносний масова витрата другого ступеня стиснення  $g_2$  визначимо з енергетичного балансу проміжного судини.

$$g_2 \times h_6 = (g_{HT} + g_{CT}) \times h_7 + (g_2 - g_{HT} - g_{CT}) \times h_8 \quad (2.11)$$

$$g_2 = (g_{HT} + g_{CT}) \times \frac{h_8 - h_7}{h_8 - h_6} = 10,6 \quad (2.12)$$

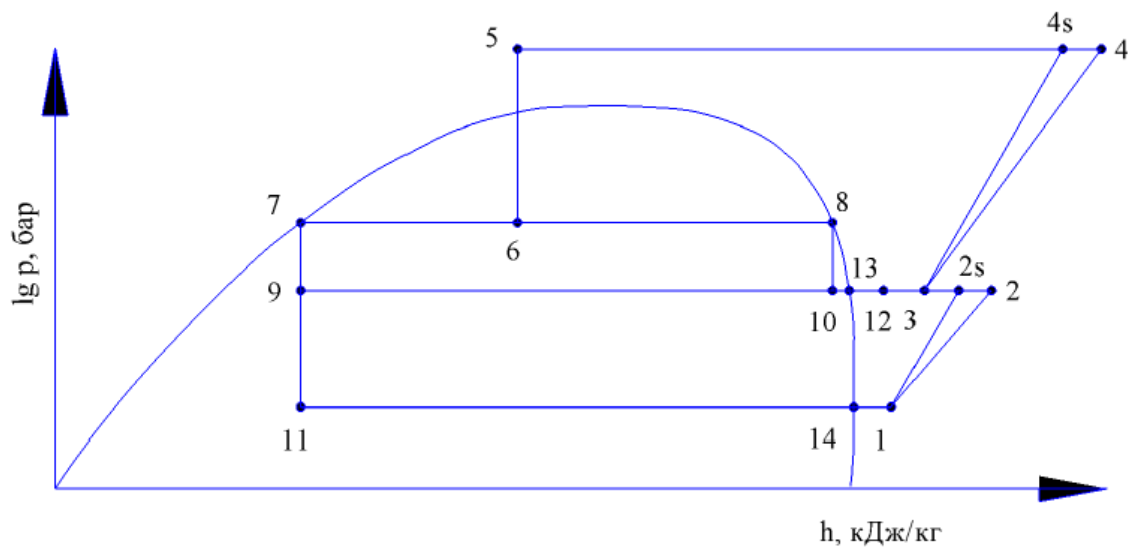


Рис. 2.2 Цикл транскритичної холодильної системи CO<sub>2</sub> (Система 1)

Ентальпію точки 2 визначимо за відомим значенням адиабатного ККД компресора першого ступеня:

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{ад}} = 505,52 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.13)$$

Ентальпію точки 3 знайдемо за рівнянням змішання:

$$g_{CT} \times h_{12} + (g_2 - g_{CT} - g_{HT}) \times h_{10} + g_{HT} \times h_2 = g_2 \times h_3 \quad (2.14)$$

$$h_3 = \frac{g_{CT} \times h_{12} + (g_2 - g_{CT} - g_{HT}) \times h_{10} + g_{HT} \times h_2}{g_2} = 446,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.15)$$

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 60   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Ентальпія в точці 4 знаходиться аналогічно рівнянню 2.13.

Параметри в вузлових точках циклу показані в Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Параметри в вузлових точках Системи 1.

| Точка | Ентальпія,<br>кДж/кг | Температура,<br>°C | Температура,<br>К | Тиск, бар | Ентропія,<br>кДж/(кг·К) |
|-------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| 1     | 446,4                | -25                | 248               | 12        | 2,07                    |
| 2s    | 481,87               | 28,3               | 301,3             | 26,5      | 2,065                   |
| 2     | 505,52               | 50,43              | 323,43            | 26,5      | 2,14                    |
| 3     | 446,75               | -1,5               | 271,5             | 26,5      | 1,942                   |
| 4s    | 503,72               | 95,16              | 368,16            | 91        | 1,942                   |
| 4     | 534,39               | 117,18             | 390,18            | 91        | 2,022                   |
| 5     | 298,36               | 35                 | 308               | 91        | 1,313                   |
| 6     | 298,36               | 0                  | 273               | 34,8      | 1,36                    |
| 7     | 200                  | 0                  | 273               | 34,8      | 1                       |
| 8     | 431,5                | 0                  | 273               | 34,8      | 1,846                   |
| 9     | 200                  | -10                | 263               | 26,5      | 1,004                   |
| 10    | 431,5                | -10                | 263               | 26,5      | 1,883                   |
| 11    | 200                  | -35                | 238               | 12        | 1,03                    |
| 12    | 448,7                | 0                  | 273               | 26,5      | 1,949                   |
| 13    | 435,16               | -10                | 263               | 26,5      | 1,899                   |
| 14    | 436,11               | -35                | 238               | 12        | 2,022                   |

Мінімальна робота, необхідна для генерації холоду, а також необхідні питомі витрати роботи стиснення на компенсацію виробництва ентропії розраховувалися як суми на відповідних ділянках з урахуванням значень відносних масових витрат.

Розрахунки проводилися за такими залежностями:

- мінімальна необхідна питома робота для генерації холоду

$$l_{\min}^{\text{HT}} = q_0^{\text{HT}} \times \frac{T_{\text{OC}} - T_{\text{П}}^{\text{HT}}}{T_{\text{П}}^{\text{HT}}} \quad (2.16)$$

$$l_{\min}^{\text{CT}} = q_0^{\text{CT}} \times \frac{T_{\text{OC}} - T_{\text{П}}^{\text{CT}}}{T_{\text{П}}^{\text{CT}}} \quad (2.17)$$

$$l_{\min} = l_{\min}^{\text{CT}} \times g_{\text{CT}} + l_{\min}^{\text{HT}} \times g_{\text{HT}} = 199,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.18)$$

- адіабатне робота стиснення

$$l_{\text{ад}}^1 = h_{2s} - h_1 \quad (2.19)$$

$$l_{\text{ад}}^2 = h_{4s} - h_3 \quad (2.20)$$

$$l_{\text{ад}} = l_{\text{ад}}^1 \times g_{\text{HT}} + l_{\text{ад}}^2 \times g_2 = 639,23 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.21)$$

- дійсна витрачається питома робота стиснення

$$l_{\text{сж}}^1 = h_2 - h_1 \quad (2.22)$$

$$l_{\text{сж}}^2 = h_4 - h_3 \quad (2.23)$$

$$l_{\text{сж}} = l_{\text{сж}}^1 \times g_{\text{HT}} + l_{\text{сж}}^2 \times g_2 = 987,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.24)$$

- ступінь термодинамічної досконалості

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{l_{\min}}{l_{\text{сж}}} = 0,2016 \quad (2.25)$$

- холодильний коефіцієнт при адіабатні процесі стиснення

$$\epsilon_{\text{ад}} = \frac{q_0^{\text{CT}} \times g_{\text{CT}} + q_0^{\text{HT}} \times g_{\text{HT}}}{l_{\text{ад}}} = 2,37 \quad (2.26)$$

- дійсне значення холодильного коефіцієнта

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 62   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

$$\varepsilon_D = \frac{q_0^{CT} \times g_{CT} + q_0^{HT} \times g_{HT}}{l_{сж}} = 1,53 \quad (2.27)$$

### 2.3. Результати розрахунку холодильної системи з CO<sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклі з паралельним стисненням

Для зменшення втрат на дроселювання застосуємо цикл з паралельним стисненням - зниження ентальпії від  $h_6$  до  $h_7$  здійснюється за рахунок установки додаткового компресора КМ3 (виключаємо дроселювання  $h_8 - h_{10}$  Рис. 2.3 і РВ4). Цикл з паралельним стисненням представлений на Рис. 2.3 і 2.4, параметри в вузлових точках – в табл. 2.3.

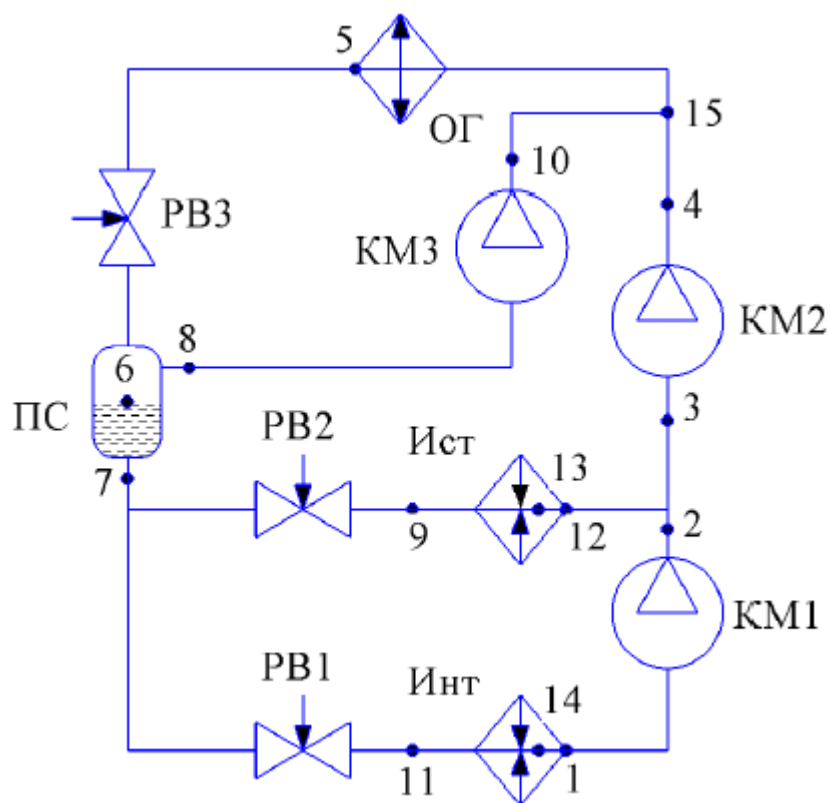


Рис. 2.3. Принципова схема транскритичної холодильної системи CO<sub>2</sub> з паралельним стисненням (Система 2): КМ1 – компресор першого ступеня стиснення, КМ2 – компресор другого ступеня стиснення, КМ3 – компресор паралельного стиснення, ОГ – охолоджувач газу, ПС – проміжний посудину, Вип<sub>СТ</sub> - випарник середнетемпературних споживачів, Вип<sub>НТ</sub> – випарник низькотемпературних споживачів, РВ1, РВ2, РВ3 – регулюючі вентилі.

Розрахунок циклу проводимо в тому ж порядку, що і попередній. Питома масова витрата, який необхідно стиснути в паралельному компресорі, визначається як:

$$g_{\text{пар}} = g_2 - g_{\text{НТ}} - g_{\text{СТ}} = 4,5 \quad (2.28)$$

Ентальпію точки 3 знайдемо за рівнянням змішання:

$$g_{\text{СТ}} \times h_{12} + g_{\text{НТ}} \times h_2 = (g_{\text{СТ}} + g_{\text{НТ}}) \times h_3 \quad (2.29)$$

$$h_3 = \frac{g_{\text{СТ}} \times h_{12} + g_{\text{НТ}} \times h_2}{g_{\text{СТ}} + g_{\text{НТ}}} = 458,02 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.30)$$

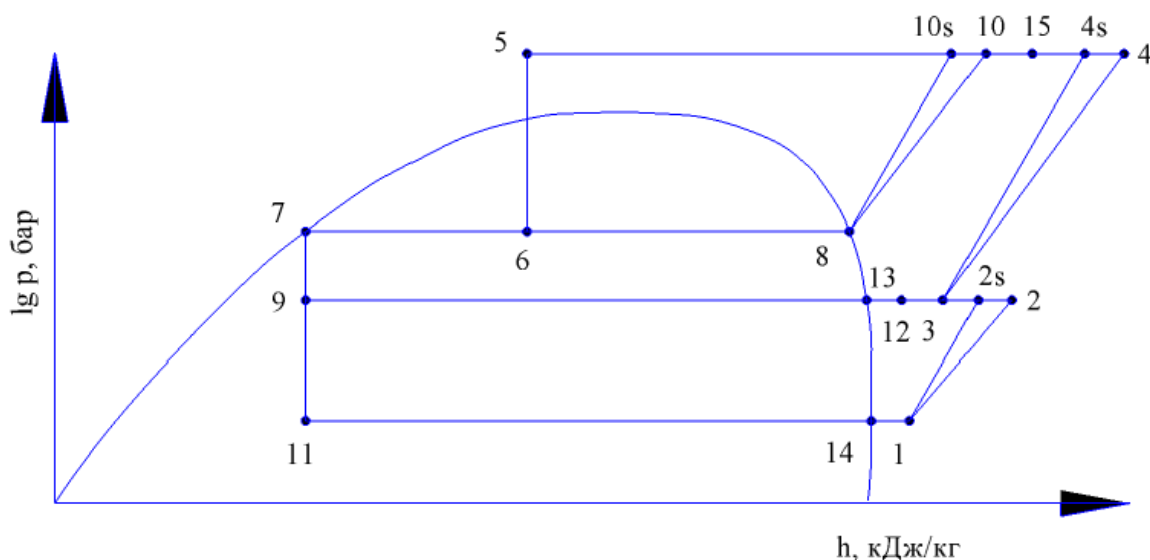


Рис. 2.4. Транскритичний цикл CO<sub>2</sub> з паралельним стисненням (Система 2).

Ентальпію в точці 15s знаходимо за рівнянням змішання питомих масових витрат компресора другого ступеня і компресора паралельного стиснення:

$$(g_{\text{СТ}} + g_{\text{НТ}}) \times h_{4s} + g_{\text{пар}} \times h_{10s} = (g_{\text{СТ}} + g_{\text{НТ}} + g_{\text{пар}}) \times h_{15s} \quad (2.31)$$

$$h_{15s} = \frac{(g_{\text{СТ}} + g_{\text{НТ}}) \times h_{4s} + g_{\text{пар}} \times h_{10s}}{(g_{\text{СТ}} + g_{\text{НТ}} + g_{\text{пар}})} = 497,93 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.32)$$

Ентальпію в точці 15 також находим по уравнению смешения:

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 64   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



$$(g_{CT} + g_{HT}) \times h_4 + g_{пар} \times h_{10} = (g_{CT} + g_{HT} + g_{пар}) \times h_{15} \quad (2.33)$$

$$h_{15} = \frac{(g_{CT} + g_{HT}) \times h_4 + g_{пар} \times h_{10}}{(g_{CT} + g_{HT} + g_{пар})} = 524,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.34)$$

Таблиця 2.3. Параметри в вузлових точках Системи 2

| Точка | Ентальпія,<br>кДж/кг | Температура,<br>°C | Температура,<br>К | Тиск, бар | Ентропія,<br>кДж/(кг·К) |
|-------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| 1     | 446,4                | -25                | 248               | 12        | 2,07                    |
| 2s    | 481,87               | 28,3               | 301,3             | 26,5      | 2,065                   |
| 2     | 505,52               | 50,43              | 323,43            | 26,5      | 2,14                    |
| 3     | 458,02               | 7,49               | 280,49            | 26,5      | 1,983                   |
| 4s    | 518,97               | 105,81             | 378,81            | 91        | 1,983                   |
| 4     | 551,79               | 130,62             | 403,62            | 91        | 2,067                   |
| 5     | 298,36               | 35                 | 308               | 91        | 1,313                   |
| 6     | 298,36               | 0                  | 273               | 34,8      | 1,36                    |
| 7     | 200                  | 0                  | 273               | 34,8      | 1                       |
| 8     | 431,5                | 0                  | 273               | 34,8      | 1,846                   |
| 9     | 200                  | -10                | 263               | 26,5      | 1,004                   |
| 10s   | 469,45               | 74,12              | 347,12            | 91        | 1,846                   |
| 10    | 487,31               | 84,54              | 357,54            | 91        | 1,897                   |
| 11    | 200                  | -35                | 238               | 12        | 1,03                    |
| 12    | 448,7                | 0                  | 273               | 26,5      | 1,949                   |
| 13    | 435,16               | -10                | 263               | 26,5      | 1,899                   |
| 14    | 436,11               | -35                | 238               | 12        | 2,022                   |
| 15    | 524,39               | 109,74             | 382,74            | 91        | 1,997                   |
| 15s   | 497,93               | 91,31              | 364,31            | 91        | 1,926                   |

Мінімальна робота, необхідна для генерації холоду, а також необхідні питомі витрати роботи стиснення на компенсацію виробництва ентропії

розраховувалися, як і в попередньому випадку, як суми на відповідних ділянках з урахуванням значень відносних масових витрат.

Розрахунки проводилися за такими залежностями:

- мінімальна необхідна питома робота (електроенергія) для генерації холоду визначається по 2.16 та 2.17.

- адіабатне робота стиснення

$$l_{ад}^1 = h_{2s} - h_1 \quad (2.35)$$

$$l_{ад}^2 = h_{4s} - h_3 \quad (2.36)$$

$$l_{ад}^{пар} = h_{10s} - h_8 \quad (2.37)$$

$$l_{ад} = l_{ад}^1 \times g_{HT} + l_{ад}^2 \times (g_{HT} + g_{CT}) + l_{ад}^{пар} \times g_{пар} = 577,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.38)$$

- дійсна витрачається питома робота стиснення

$$l_{сж}^1 = h_2 - h_1 \quad (2.39)$$

$$l_{сж}^2 = h_4 - h_3 \quad (2.40)$$

$$l_{сж}^{пар} = h_{10} - h_8 \quad (2.41)$$

$$l_{сж} = l_{сж}^1 \times g_{HT} + l_{сж}^2 \times (g_{HT} + g_{CT}) + l_{сж}^{пар} \times g_{пар} = 881,96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.42)$$

- ступінь термодинамічної досконалості

$$\eta_{терм} = \frac{l_{min}}{l_{сж}} = 0,2258 \quad (2.43)$$

- холодильний коефіцієнт при адіабатні процесі стиснення

$$\epsilon_{ад} = \frac{q_o^{CT} \times g_{CT} + q_o^{HT} \times g_{HT}}{l_{ад}} = 2,62 \quad (2.44)$$

- дійсне значення холодильного коефіцієнта

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 66   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

$$\varepsilon_{\text{Д}} = \frac{q_0^{\text{СТ}} \times g_{\text{СТ}} + q_0^{\text{НТ}} \times g_{\text{НТ}}}{l_{\text{сж}}} = 1,72 \quad (2.45)$$

#### 2.4. Результати аналізу холодильної системи з CO<sub>2</sub> для НТ і СТ споживачів, що працює по транскритичному циклу з паралельним стисненням і ежектором

Відповідно до наведеного вище аналізу, втрати при дроселюванні займають значну частину в загальній частці втрат в процесах холодильного циклу. Оскільки дроселювання це процес розширення робочої речовини без здійснення зовнішньої роботи, доцільно було б використовувати пристрій, яке дозволяло б повертати частину роботи назад в цикл, тим самим зменшуючи втрати. Ідеальним рішенням даної проблеми стало б застосування детандера, однак, у порівнянні з застосовуваними розширювальними пристроями (теплорегулюючі вентилі, електричні регулюючі клапани, капілярні трубки, дросельні шайби) конструкція детандера складніше і його застосування збільшує капітальні витрати.

Як альтернативне рішення для циклів із застосуванням CO<sub>2</sub> застосовується ежектор Їжак замість регулюючого вентиля РВЗ.

Дослідженню особливостей застосування даного пристрою в холодильних циклах присвячено багато робіт.

Цикл з ежектором і паралельним стисненням представлений на Рис. 2.5 і 2.6.

При розрахунку даній системі необхідно задатися деякими характеристиками ежектора: ступінь підвищення тиску 1,31, відношення витрати ежектіруемого потоку до витрати робочого потоку 0,146:

$$\frac{g_{\text{р}}}{g_{\text{э}}} = 0,146 \quad (2.46)$$

Відносні масові витрати низькотемпературного і середнетемпературного контурів визначаємо по 2.14.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 67   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

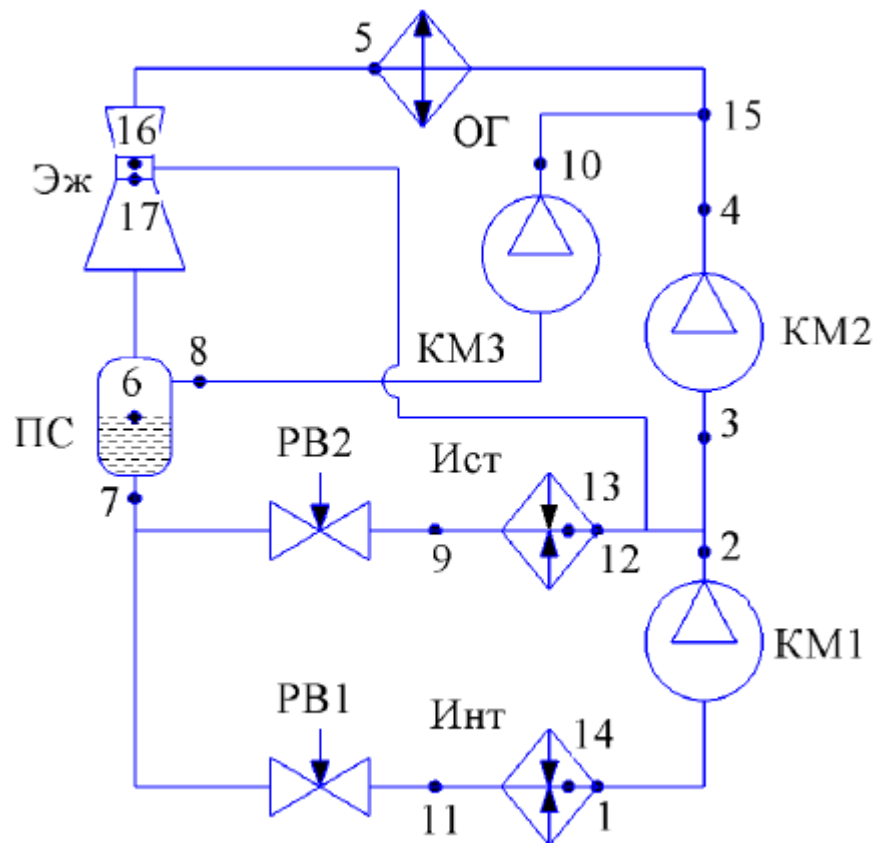


Рис. 2.5. Принципова схема транскритичної холодильної системи CO<sub>2</sub> з паралельним стисненням (Система 3): КМ1 – компресор першого ступеня стиснення, КМ2 – компресор другого ступеня стиснення, КМ3 – компресор паралельного стиснення, ОГ – охолоджувач газу, ПС – проміжний посудину, Вип<sub>ст</sub> – випарник середнетемпературних споживачів, Вип<sub>нт</sub> – випарник низькотемпературних споживачів, РВ1, РВ2 – регулюючі вентилі, ЕЖ – ежектор.

Розрахунок проводимо в такій послідовності:

Визначаємо ентропію точки 16 з умови адиабатного розширення робочого потоку, знаходимо інші параметри в цій точці по діаграмі властивостей холодоагенту. Знаходимо ентальпію точки 17 з рівняння змішання в ежекторі, знаходимо ентропію в цій точці по діаграмі властивостей холодоагенту. З умови адиабатного стиснення в ежекторі знаходимо ентропію точки 6. Визначаємо значення питомої масової витрати паралельного стиснення. Для визначення цих параметрів складемо систему рівнянь 2.47.

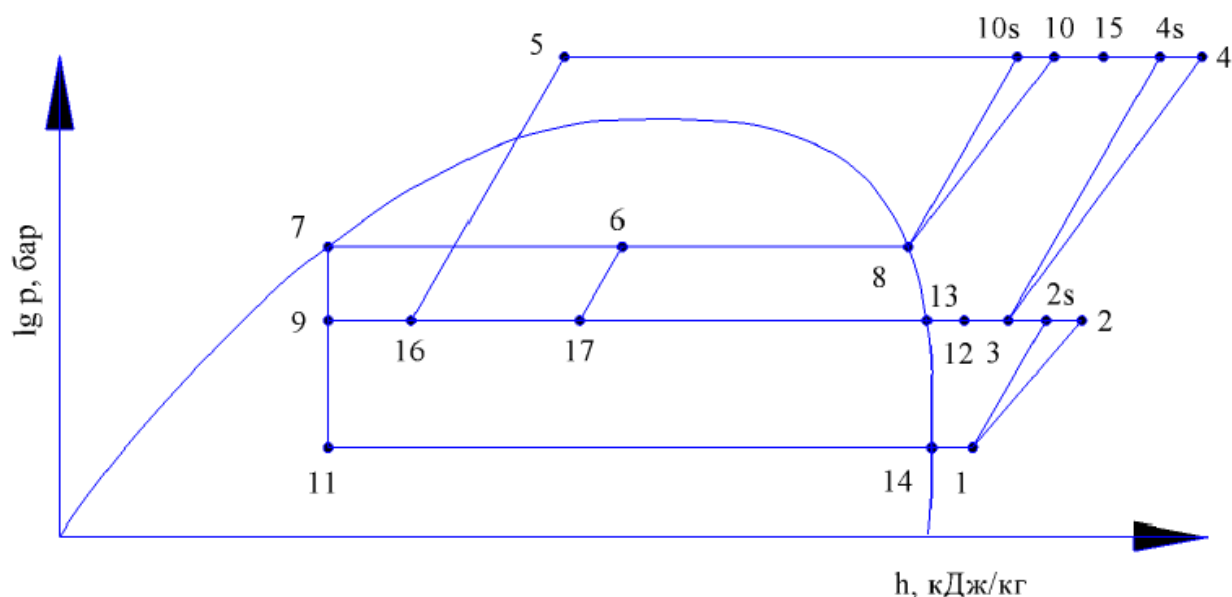


Рис. 2.6. Транскритичний цикл CO<sub>2</sub> з паралельним стисненням і ежектором (Система 3).

$$\begin{cases} g_p = g_{HT} + g_{CT} + g_{пар} - g_{э} \\ \frac{g_{э}}{g_p} = 0,146 \\ g_p \times h_{16} + g_{э} \times h_3 = (g_p + g_{э}) \times h_{17} \\ (g_{HT} + g_{CT} + g_{пар}) \times h_6 = (g_{HT} + g_{CT}) \times h_7 + g_{пар} \times h_8 \end{cases} \quad (2.47)$$

В результаті рішення отримуємо такі значення питомих масових витрат:

$$\begin{aligned} g_p &= 10,04 \\ g_{э} &= 1,47 \\ g_{пар} &= 5,42 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Параметри в вузлових точках циклу представлені в Таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Параметри в вузлових точках Системи 3

| Точка | Ентальпія,<br>кДж/кг | Температура,<br>°C | Температура,<br>К | Тиск, бар | Ентропія,<br>кДж/(кг·К) |
|-------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| 1     | 446,4                | -25                | 248               | 12        | 2,07                    |
| 2s    | 481,87               | 28,3               | 301,3             | 26,5      | 2,065                   |
| 2     | 505,52               | 50,43              | 323,43            | 26,5      | 2,14                    |

|     |        |        |        |      |       |
|-----|--------|--------|--------|------|-------|
| 3   | 458,02 | 7,49   | 280,49 | 26,5 | 1,983 |
| 4s  | 518,97 | 105,81 | 378,81 | 91   | 1,983 |
| 4   | 551,79 | 130,62 | 403,62 | 91   | 2,067 |
| 5   | 298,36 | 35     | 308    | 91   | 1,313 |
| 6   | 308,94 | 0      | 273    | 34,8 | 1,399 |
| 7   | 200    | 0      | 273    | 34,8 | 1     |
| 8   | 431,5  | 0      | 273    | 34,8 | 1,846 |
| 9   | 200    | -10    | 263    | 26,5 | 1,004 |
| 10s | 469,45 | 74,12  | 347,12 | 91   | 1,846 |
| 10  | 487,31 | 84,54  | 357,54 | 91   | 1,897 |
| 11  | 200    | -35    | 238    | 12   | 1,03  |
| 12  | 448,7  | 0      | 273    | 26,5 | 1,949 |
| 13  | 435,16 | -10    | 263    | 26,5 | 1,899 |
| 14  | 436,11 | -35    | 238    | 12   | 2,022 |
| 15  | 517,02 | 104,37 | 377,37 | 91   | 1,978 |
| 16  | 281,12 | -10    | 263    | 26,5 | 1,313 |
| 17  | 303,72 | -10    | 263    | 26,5 | 1,399 |

Произведем расчёт данной системы:

- минимальная необходимая удельная работа для генерации холода определяется по 2.18.

- адіабатне робота стиснення

$$l_{ад}^1 = h_{2s} - h_1$$

$$l_{ад}^2 = h_{4s} - h_3$$

$$l_{ад}^{пар} = h_{10s} - h_8$$

$$l_{ад} = l_{ад}^1 \times g_{нт} + l_{ад}^2 \times (g_{нт} + g_{ст}) + l_{ад}^{пар} \times g_{пар} = 522,94 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.49)$$

- дійсна витрачається питома робота стиснення

|     |      |          |        |      |      |
|-----|------|----------|--------|------|------|
|     |      |          |        |      | Арк. |
|     |      |          |        |      | 70   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |      |

$$l_{\text{сж}}^1 = h_2 - h_1$$

$$l_{\text{сж}}^2 = h_4 - h_3$$

$$l_{\text{сж}}^{\text{пар}} = h_{10} - h_8$$

$$l_{\text{сж}} = l_{\text{сж}}^1 \times g_{\text{HT}} + l_{\text{сж}}^2 \times (g_{\text{HT}} + g_{\text{СТ}}) + l_{\text{сж}}^{\text{пар}} \times g_{\text{пар}} = 795,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.50)$$

- ступінь термодинамічної досконалості

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{l_{\text{min}}}{l_{\text{сж}}} = 0,2505 \quad (2.51)$$

- холодильний коефіцієнт при адіабатні процесі стиснення

$$\epsilon_{\text{ад}} = \frac{q_0^{\text{СТ}} \times g_{\text{СТ}} + q_0^{\text{HT}} \times g_{\text{HT}}}{l_{\text{ад}}} = 2,89 \quad (2.52)$$

- дійсне значення холодильного коефіцієнта

$$\epsilon_{\text{д}} = \frac{q_0^{\text{СТ}} \times g_{\text{СТ}} + q_0^{\text{HT}} \times g_{\text{HT}}}{l_{\text{сж}}} = 1,9 \quad (2.53)$$

## 2.5. Результати аналізу каскадної холодильної системи з CO<sub>2</sub>, що працює по субкритичного циклу (нижня гілка каскаду) для HT і R134a (верхня гілка каскаду) СТ споживачів

Конструкція каскадних холодильних систем включає в себе нижній каскад з CO<sub>2</sub> в якості холодоагенту (парокомпресійний цикл в докритичній області) для холодопостачання низькотемпературних споживачів і верхній каскад з R134a (найбільш поширений холодоагент) для холодопостачання середньотемпературних споживачів і для конденсації пари CO<sub>2</sub> нижнього каскаду .

Принципова схема і цикл каскадної холодильної системи представлений на Рис. 2.6 і 2.7.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 71   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Адіабатні ККД компресорів нижнього і верхнього каскаду прийняті на основі статистичних даних 0,6232 і 0,6374 відповідно.

Верхній і нижній каскади являють собою одноступінчасті парокомпресійні цикли з одноразовим дроселюванням холодоагенту, пов'язані спільним теплообмінним апаратом - випарником-конденсатором (випарник для верхнього каскаду, конденсатор - для нижнього).

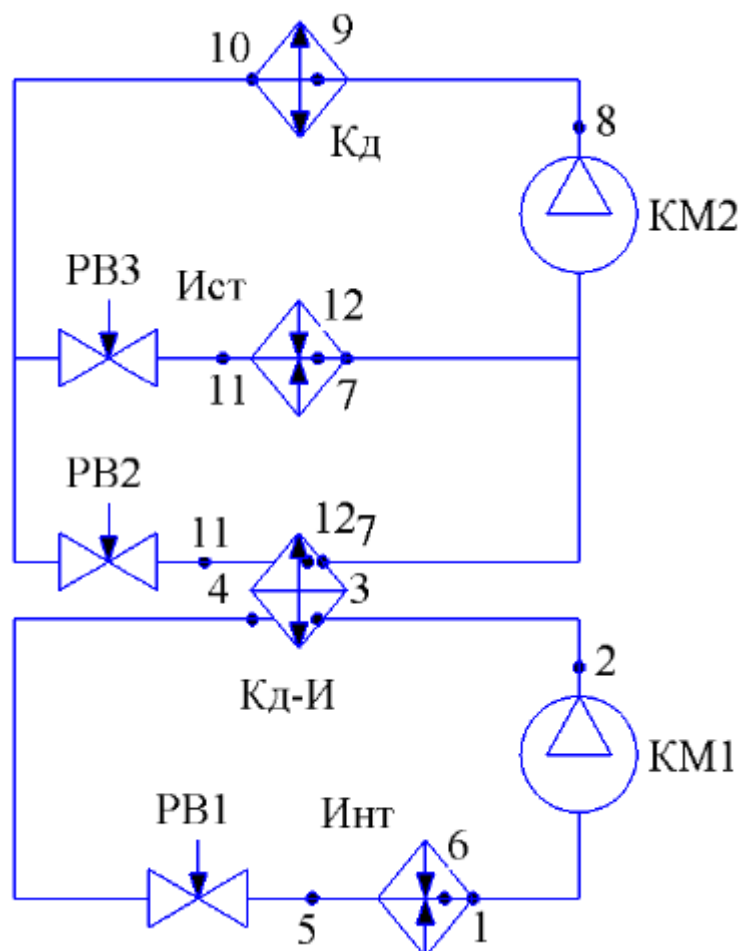


Рис. 2.6. Принципова схема каскадної холодильної системи (Система 4): KM1 – компресор нижньої гілки каскаду, KM2 – компресор верхньої гілки каскаду, Kд – конденсатор, Kд-Вип – випарник-конденсатор, Вип<sub>ст</sub> – випарник середнетемпературних споживачів, Вип<sub>нт</sub> – випарник низькотемпературних споживачів, PB1, PB2, PB3 – регулюючі вентилі.

Параметри в вузлових точках каскадної холодильної системи наведені в таблиці 2.5.

Питома масова холодопродуктивність середнетемпературного контуру:

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 72   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



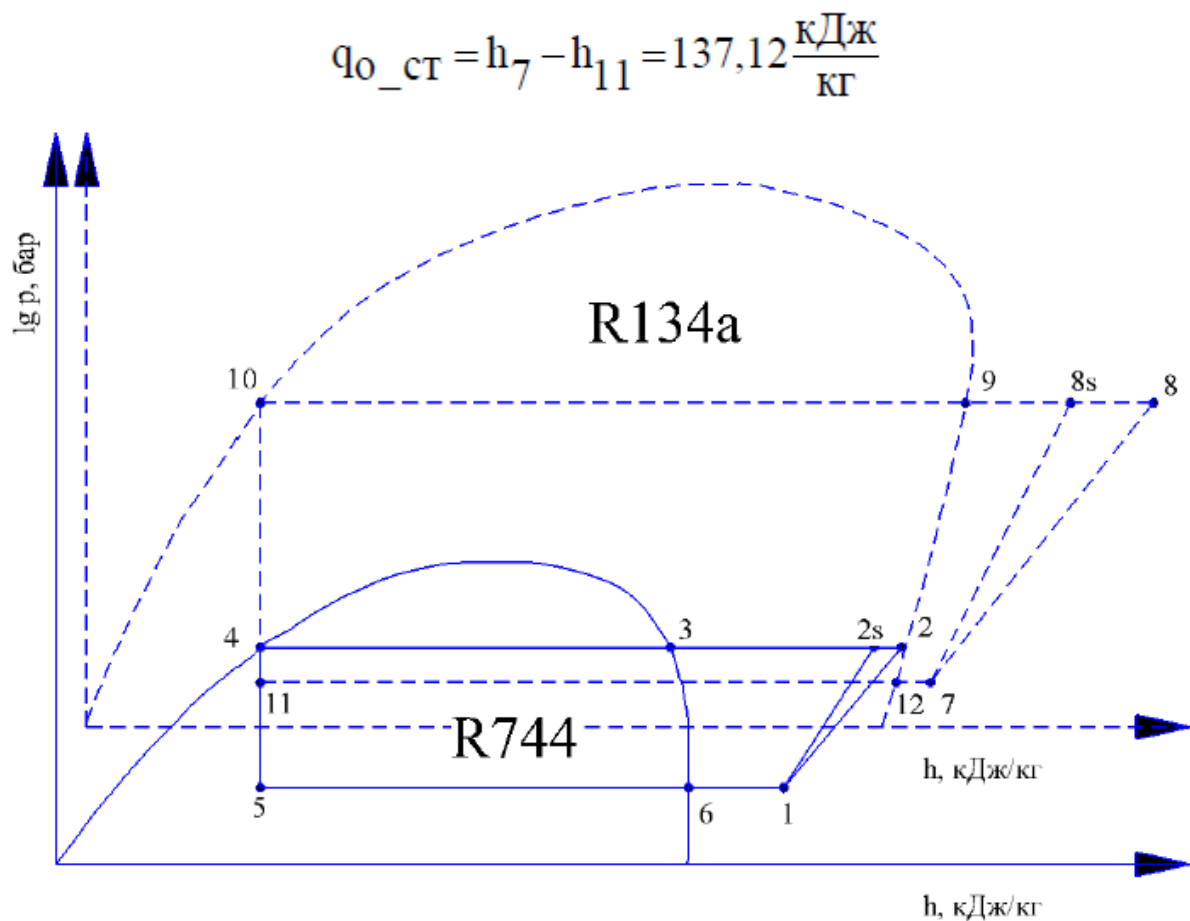


Рис. 2. 7. Цикл каскадної холодильної системи на CO<sub>2</sub> в нижньому каскаді та R134a у верхньому.

Таблиця 2.5. Параметри в вузлових точках каскадної холодильної системи.

| Точка                   | Ентальпія,<br>кДж/кг | Температура,<br>°C | Температура,<br>К | Тиск, бар | Ентропія,<br>кДж/(кг·К) |
|-------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| R744 (CO <sub>2</sub> ) |                      |                    |                   |           |                         |
| 1                       | 446,44               | -25                | 248,00            | 12,05     | 2,065                   |
| 2s                      | 488,87               | 38,71              | 311,71            | 30,47     | 2,065                   |
| 2                       | 514,52               | 62,36              | 335,36            | 30,47     | 2,144                   |
| 3                       | 433,46               | -5                 | 268,00            | 30,47     | 1,873                   |
| 4                       | 188,23               | -5                 | 268,00            | 30,47     | 0,958                   |
| 5                       | 188,23               | -35                | 238,00            | 12,05     | 0,982                   |
| 6                       | 436,11               | -35                | 238,00            | 12,05     | 2,022                   |
| R134a                   |                      |                    |                   |           |                         |
| 7                       | 401,02               | 0                  | 273,00            | 2,01      | 1,7646                  |

|    |        |      |        |      |        |
|----|--------|------|--------|------|--------|
| 8s | 439,56 | 61,1 | 334,10 | 2,01 | 1,7646 |
| 8  | 461,48 | 81,4 | 354,40 | 11,6 | 1,8283 |
| 9  | 421,44 | 45   | 318,00 | 11,6 | 1,709  |
| 10 | 263,9  | 45   | 318,00 | 11,6 | 1,2132 |
| 11 | 263,9  | -10  | 263,00 | 2,01 | 1,2442 |
| 12 | 392,58 | -10  | 263,00 | 2,01 | 1,7331 |

Питома масова холодопродуктивність низькотемпературного контуру:

$$q_{o\_HT} = h_1 - h_5 = 258,21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.54)$$

Для визначення відносних масових витрат холодоагенту необхідно визначити питому масову витрату холодоагенту верхнього каскаду, необхідний для конденсації парів холодоагенту нижнього каскаду.

$$g_{HT} = 1$$

$$g_{CT}^{HT} = \frac{h_2 - h_4}{q_{o\_CT}} \times g_{HT} = 2,38 \quad (2.55)$$

Відносний масова витрата верхнього каскаду

$$g_{CT}^{пол} = \frac{\left( \frac{Q_{CT}}{q_{o\_CT}} \right)}{\left( \frac{Q_{HT}}{q_{o\_HT}} \right)} = 9,68$$

$$g_{CT} = g_{CT}^{пол} + g_{CT}^{HT} = 12,06 \quad (2.56)$$

Розрахунок каскадної холодильної системи проводимо з урахуванням питомих масових витрат окремо для верхнього та нижнього каскадів за такими залежностями:

- мінімальна необхідна питома робота для генерації холоду

$$l_{min}^{CT} = q_{o\_CT} \times \frac{T_{OC} - T_{п}^{CT}}{T_{п}^{CT}} \times g_{CT}^{пол} = 155,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.57)$$

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 74   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

$$l_{\min}^{\text{HT}} = q_{0\_HT} \times \frac{T_0^{\text{CT}} - T_{\Pi}^{\text{HT}}}{T_{\Pi}^{\text{HT}}} \times g_{\text{HT}} + q_{0\_CT} \times \frac{T_{0\text{C}} - T_0^{\text{CT}}}{T_0^{\text{CT}}} \times g_{\text{CT}}^{\text{HT}} = 62,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.58)$$

$$l_{\min} = l_{\min}^{\text{CT}} + l_{\min}^{\text{HT}} = 217,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.59)$$

- адіабатне робота стиснення

$$l_{\text{ад}} = (h_{2s} - h_1) \times g_{\text{HT}} + (h_{8s} - h_7) \times g_{\text{CT}} = 507,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.60)$$

- дійсна витрачається питома робота стиснення

$$l_{\text{сж}} = (h_2 - h_1) \times g_{\text{HT}} + (h_8 - h_7) \times g_{\text{CT}} = 797,53 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (2.61)$$

- ступінь термодинамічної досконалості

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{l_{\min}}{l_{\text{сж}}} = 0,2733 \quad (2.62)$$

- холодильний коефіцієнт при адіабатні процесі стиснення

$$\epsilon_{\text{ад}} = \frac{q_0}{l_{\text{ад}}} = 3,13 \quad (2.63)$$

- дійсне значення холодильного коефіцієнта

$$\epsilon_{\text{Д}} = \frac{q_0}{l_{\text{сж}}} = 1,99 \quad (2.64)$$

Висновок: було проведено розрахунки чотирьох систем холодопостачання з використанням, CO<sub>2</sub> в якості холодоагенту. Проведені розрахунки показали що найменша витрачена робота стискання є для циклу з використанням ежектору. Холодильний коефіцієнт для циклу на CO<sub>2</sub> з використанням ежектору на 15% вище ніж для транскритичної системи та на 9-10% вище ніж для бустерної системи.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 75   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

## РОЗДІЛ III. Аналітична частина.

### 3.1 Оцінка енергоефективності систем на CO<sub>2</sub> для супермаркетів.

#### Кліматична характеристика життєвого циклу (LCCP)

Кліматична характеристика життєвого циклу або LCCP є стандартним показником при порівнянні різних технологій по їх впливу на зміну клімату та вимірюється як приблизний еквівалент викидів CO<sub>2</sub>, виражений в фунтах. Традиційні холодильні системи на Гідрофторвуглеці (ДФУ) мають прямим і непрямим дією на величину LCCP. Пряма дія визначається безпосереднім викидом холодоагенту в атмосферу і засноване на значенні потенціалу глобального потепління (ПГП) холодоагенту (як і LCCP, ПГП заснований на зміні клімату при викидах холодоагенту в атмосферу в порівнянні з CO<sub>2</sub>). Викид хладагента в атмосферу ні в якому разі не повинен бути навмисним (це заборонено в багатьох країнах), проте це періодично трапляється в перебігу життєвого циклу холодильних систем, переважно у вигляді витоків. Оскільки ці витоків можуть бути мінімізовані, застосування холодоагентів з низьким ПГП, таких як CO<sub>2</sub>, може звести цей параметр до незначної величини (ПГП CO<sub>2</sub> - 1, в той час, як ПГП для R404a - 4000). Важливо відзначити, що розглядається введення норм і правил, які накладають грошові штрафи за витоків холодоагентів.

Непряме вплив полягає в споживанні електроенергії, необхідної для функціонування холодильної установки. Чим менше електроенергії споживає обладнання під час роботи, тим менше буде внесок у зміну клімату. Оскільки обидва цих компонента надають рівнозначне вплив, навіть щодо малоефективні системи з низьким ПГП можуть все ще зменшувати вплив на зміну клімату.

Фінансовий аспект - енергоефективність.

Фінансовий аспект, мабуть, більш важливий для широкого впровадження систем на CO<sub>2</sub>, оскільки останні дорожче систем на традиційних хладагентах.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 76   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Оскільки системи на CO<sub>2</sub> працюють при більш високому тиску (додаток до вартості компонентів), вони більш складні в порівнянні з системами на традиційних хладагентах (оскільки потрібна установка додаткових компонентів, таких як вентилів для перепуску, вентилі та іншої додаткової автоматики) і менш масові (по крайній мере, в Північній Америці), що перешкоджає зниженню вартості компонентів і монтажу. Відповідно до цього, збільшення капітальних витрат має компенсуватися зниженням експлуатаційних витрат.

Очевидно, що існують інші фінансові показники систем на CO<sub>2</sub>, такі як довгострокове законодавство і суспільний вплив, але їх оцінка скрутна. Тому доцільно використовувати спрощену фінансову модель, де розглядається тільки енергоефективність на протизагу збільшеним капітальними витратами.

Очевидно, що фізичні властивості CO<sub>2</sub> є початковими проблемами в порівнянні з ДФУ щодо питання енергоспоживання. Ці проблеми викликані більш, ніж п'ятикратним перевищенням робочого тиску (у порівнянні з R22) і відповідними характеристиками процесів теплообміну і дроселювання. Незважаючи на те, що ці недоліки здаються значними, такі системи споживають на 20% більше електроенергії, ніж системи з ДФУ, вони легко усуваються за рахунок конструкції системи.

З іншого боку, CO<sub>2</sub> має також властивостями, що дозволяють збільшити енергоефективність системи: високе значення об'ємної ефективності (в 6 разів перевищує аналогічний показник R22), низький ступінь стиснення (відношення тисків на виході і вході в компресор), низька в'язкість (легше переміщати за допомогою насоса). Додатково, розроблені нові технології, извлекающие переваги з унікальних властивостей CO<sub>2</sub> для збільшення енергоефективності.

#### Енергозбереження - ГФУ і CO<sub>2</sub> системи

Роблять питання енергозбереження ДФУ і CO<sub>2</sub> систем технології, які можуть бути використані як для CO<sub>2</sub> (типове застосування), так і для ДФУ

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 77   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

систем. Вони можуть збільшити капітальні витрати систем на CO<sub>2</sub> в порівнянні з ДФУ системами, але можуть бути враховані окремо і обґрунтовані з фінансової точки зору для будь-якої системи. Багато ритейлери виявили, що впровадження передових технологій енергозбереження для існуючих систем на ГФУ гірше з фінансової точки зору.

Нижче наведені три ключові технології, які потрапили в цю категорію. По-перше електричні розширювальні вентиля (ЕРВ) з контролерами, які дозволяють оптимізувати тиск всмоктування для зменшення навантаження на компресори при зміні умов роботи. По-друге, застосування електродвигунів з частотними перетворювачами для того, щоб продуктивності компресора і конденсатора точно відповідали зміни навантаження. По-третє, система рекуперації теплоти для використання теплоти охолоджувальної системи.

Рекуперація теплоти, особливо з системах з ДФУ, застосовується головним чином в якості додаткової міри для задоволення потреби підприємства в гарячій воді з-за низької якості скидний теплоти (тобто низьких температур). У CO<sub>2</sub> системах температура цього джерела теплоти значно вище і дозволяє використовувати цю технологію для отримання гарячої води, опалення та інших потреб.

#### Специфічні технології для CO<sub>2</sub>

Специфічні технології для CO<sub>2</sub> беруть до уваги конструкцію системи. Бустерні системи вимагають особливої конструкції трубопроводів для того, щоб компресор низькому ступені зміг стиснути холодоагент і подати його на всмоктування компресора високого ступеня, економлячи енергію і роботу. Паралельне стиснення приймає на себе частину продуктивності компресора високого ступеня (середньотемпературна компресор) для повторного стиснення при більш низького ступеня стиснення, насичений пар утворюється при розширенні газу після охолоджувача, при його «відкачування» виходить насичена рідина. Велика кількість газу в проміжному ресівері означає втрату продуктивності системи, в той час як повторне його стиснення з мінімальними

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 78   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

витратами роботи можуть збільшити ефективність системи до 20% в порівнянні зі звичайним транскрітичним циклом.

Недавньої розробкою є застосування пристрою, званого ежектор. Ежектор використовує стиснене пар високого тиску з охолоджувача газу і використовувати енергію, зазвичай втрачаємо при дроселюванні, для збільшення тиску пари в проміжному ресівері, зменшуючи тим самим роботу, затрачену при паралельному стисненні. Ця технологія дуже ефективна і може усунути недоліки застосування транскрітичних систем в теплому кліматі.

Енергозбереження.

Підсумовуючи все сказане, можна зробити наступні висновки для систем, що працюють в теплому кліматі (оцінюється цілорічна робота системи):

|                                                         | Транскритическая система CO <sub>2</sub> | ГФУ система |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------|
| Базовая система, эффективность                          | -20 %                                    | 0 %         |
| ЭРВ с контроллерами                                     | +10 %                                    | +10 %       |
| Электродвигатели с частотными преобразователями         | +5 %                                     | +5 %        |
| Рекуперация теплоты                                     | +10 %                                    | +5 %        |
| Бустерная система                                       | +5 %                                     |             |
| Параллельное сжатие                                     | +10 %                                    |             |
| Эжектор                                                 | +10 %                                    |             |
| Общее преимущество перед базовой ГФУ системой           | +30 %                                    | +20 %       |
| Общее преимущество перед модернизированной ГФУ системой | +10 %                                    |             |

Рис. 2.8 Заходи з підвищення ефективності.

Слід зауважити, що збільшення енергоефективності в холодному кліматі може бути менше, спілкуватися ефективність транскрітичних CO<sub>2</sub> системувелічаттєся з пониженням температур зовнішнього повітря (зі зменшенням часу роботи в транскрітическом режимі).

В цей аналіз не включено застосування адиабатических або випарних конденсаторів / охолоджувачів газу, що може забезпечити додатково 5% зростання енергоефективності для кожної системи. Фактично, при додаткової уваги до конструкції системи, охолоджувач газу в транскрітической системі може бути підібраний таким чином, щоб використовувати до 80% менше води, ніж для ДФУ системи. Переваги даної технології змінюються в залежності від клімату і специфіки роботи системи. Цю цікаву технологію слід брати до уваги.

У той час як даний аналіз не може претендувати на строгість для всіх застосувань, метою цієї статті було підсумувати ситуацію і доступні технології, щоб надати ясний погляд на сьогоденні можливості. Транскритическая технологія CO<sub>2</sub> очевидно готова до пріменеуію в практично будь-якому кліматі і може забезпечити переваги як фінансові, так і для навколишнього середовища.

### 3.2 Результати аналізу холодильних систем.

Було проведено аналіз циклів транскритичних холодильних систем. Системи було розраховано на два температурні рівні середньотемпературній – температура кипіння -10°C та низькотемпературний – температура кипіння -35°C. Було розглянуто цикл транскритичної системи а також цикли з використанням паралельного стискання, бустерну систему, а також використання ежекторів. Для порівняння було розглянуто каскадну холодильну систему з R134a у верхньому каскаді.

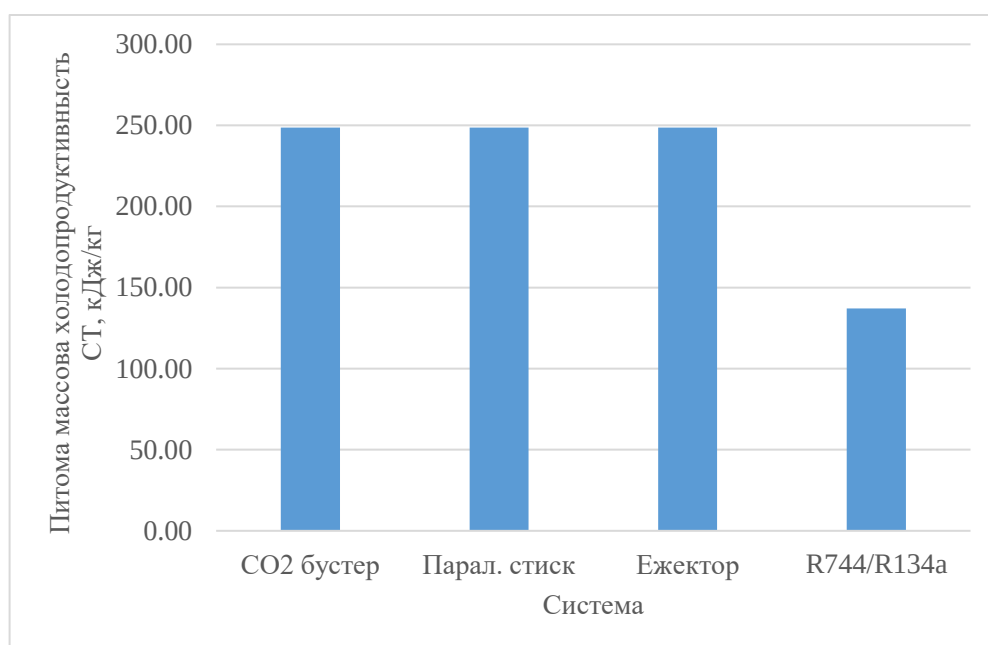


Рис. 3.1 Питома масова холодопродуктивність середньотемпературної системи



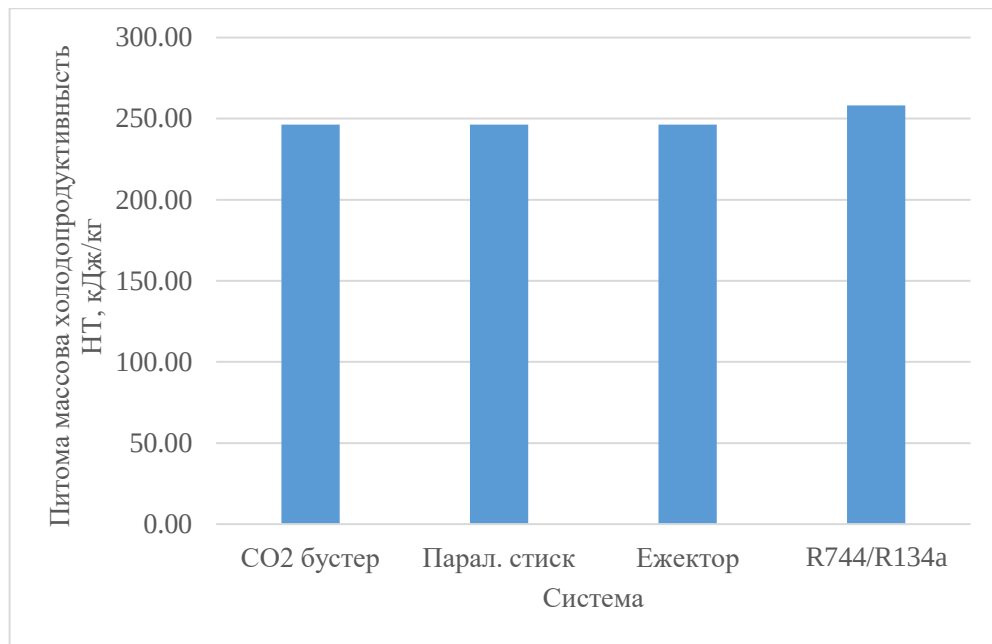


Рис. 3.2. Питома масова холодопродуктивність низькотемпературної системи

З графіку 3.1 та 3.2 можна бачити що питома масова холодопродуктивність для розглянутих систем в середньотемпературному режимі вища для систем на CO<sub>2</sub>, для верхнього каскаду на R134a питома холодопродуктивність нижча майже на 40-50%, це обумовлено теплофізичними властивостями холодоагенту. Питома масова холодопродуктивність низькотемпературної системи знаходиться в той самий час на одному рівні.

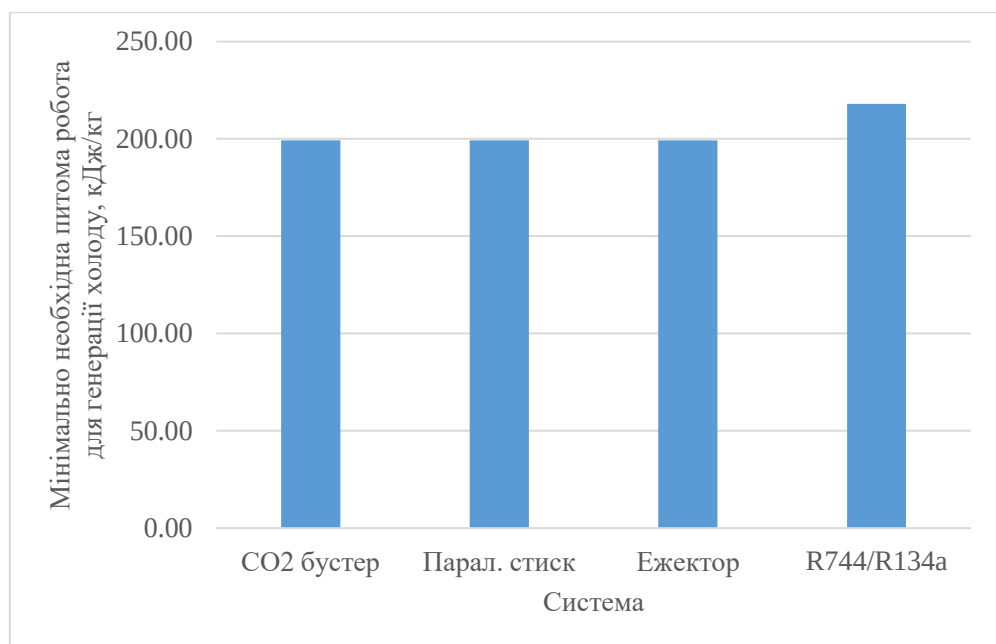


Рис. 3.3. Мінімально необхідна робота для генерації холоду

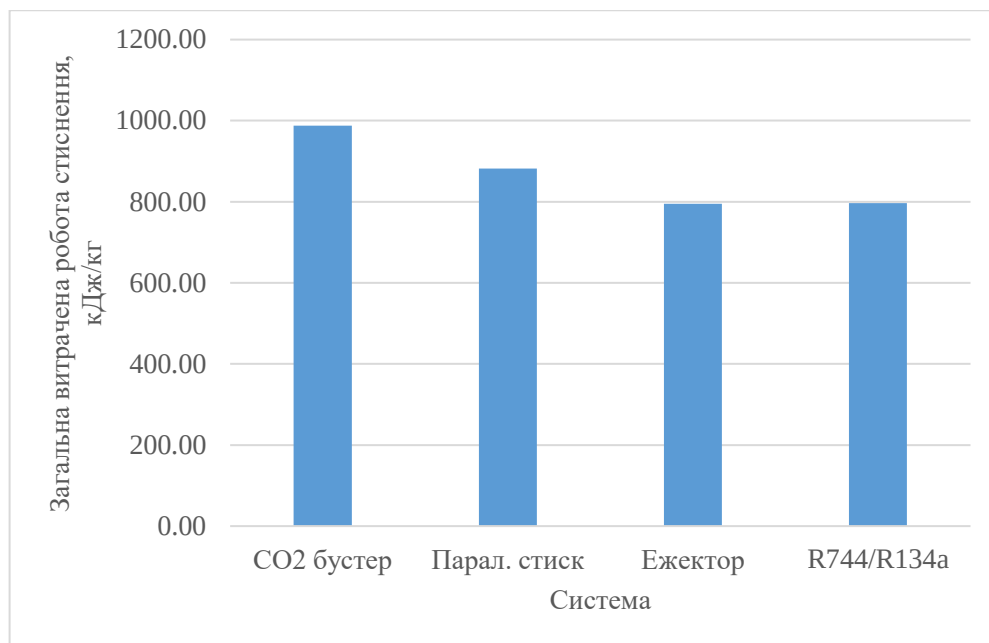


Рис. 3.4. Загальна витрачена робота стиснення

Результати розрахунку мінімальної та загальної роботи стиснення приведено на рис. 3.3 та 3.4. Оскільки транскритичні системи мають однакову базу та розрізняються лише установкою додаткових компонентів для підвищення ефективності, або для використання при різній температурі навколишнього середовища мінімально необхідна робота стиску не змінюється. Для каскадної системи мінімальна робота стиску більша на 7-10%.

Розрахунок загальної роботи стиску показав зниження витраченої роботи при використанні ежектору та паралельного стиску і вона знаходиться на рівні з каскадною системою.

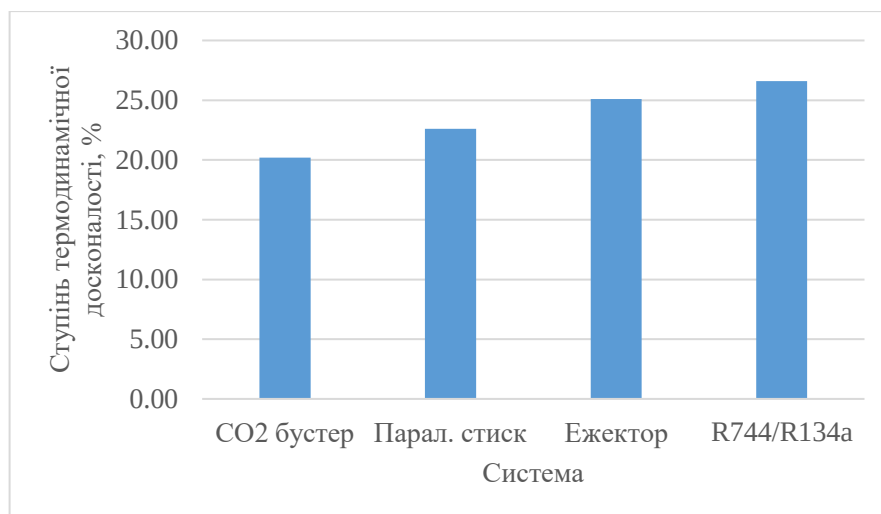


Рис. 3.5 Ступінь термодинамічної досконалості.

Розрахунок ступені термодинамічної досконалості показав що найбільший показник є для системи з ежектором та каскадної системи. Подальше порівняння можливо провести для каскадної системи з іншим хладагентом у верхньому каскаді, наприклад з пропаном.

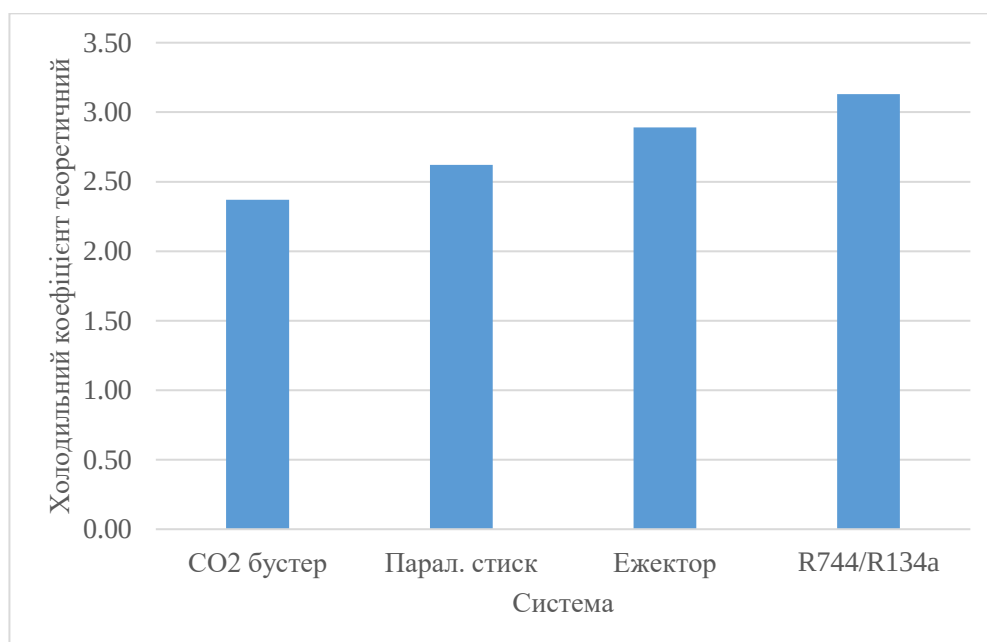


Рис. 3.6 Теоретичний холодильний коефіцієнт

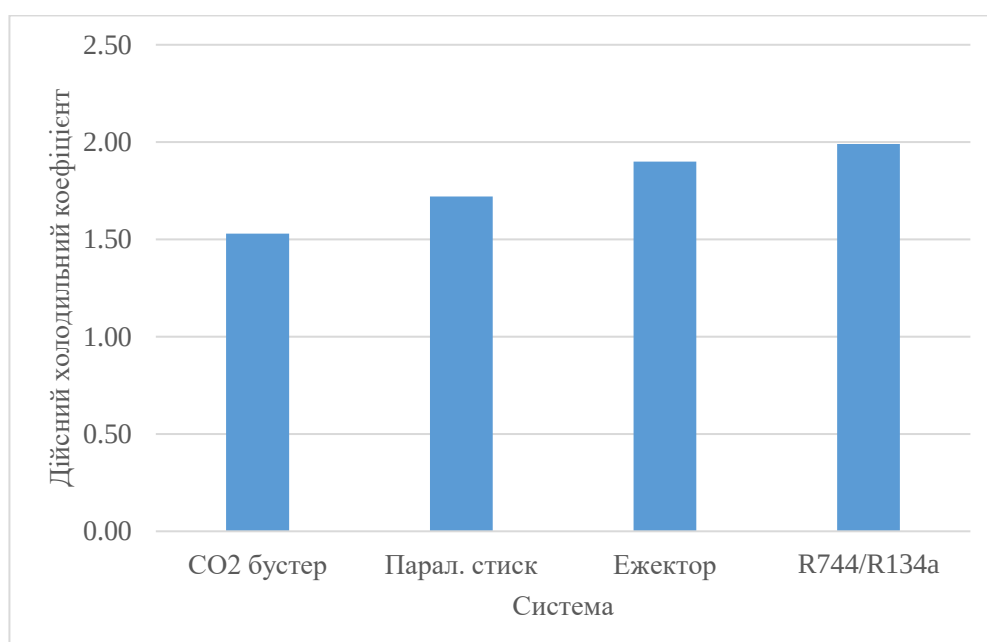


Рис. 3.7 Дійсний холодильний коефіцієнт

Розрахунок холодильного коефіцієнту представлено на рис. 3.6 та 3.7. Показано що найбільший показник є для системи з ежектором та каскадної системи. Відповідно до наведеного вище аналізу, втрати при дроселюванні

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 83   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

займають значну частину в загальній частці втрат в процесах холодильного циклу. Оскільки дроселювання це процес розширення робочої речовини без здійснення зовнішньої роботи, доцільно було б використовувати пристрій, який дозволяв б повертати частину роботи назад в цикл, тим самим зменшуючи втрати. Ідеальним рішенням даної проблеми стало б застосування детандера, однак, у порівнянні з застосовуваними розширювальними пристроями (теплорегулюючі клапани, електричні регулюючі клапани, капілярні трубки, дросельні шайби) конструкція детандера складніше і його застосування збільшує капітальні витрати.

Як альтернативне рішення для циклів із застосуванням CO<sub>2</sub> застосовується ежектор замість регулюючого вентиля РВЗ.

Конструкція каскадних холодильних систем включає в себе нижній каскад з CO<sub>2</sub> в якості холодоагенту (парокомпресійний цикл в докритичній області) для холодопостачання низькотемпературних споживачів і верхній каскад з R134a (найбільш поширений холодоагент) для холодопостачання середньотемпературних споживачів і для конденсації пари CO<sub>2</sub> нижнього каскаду .

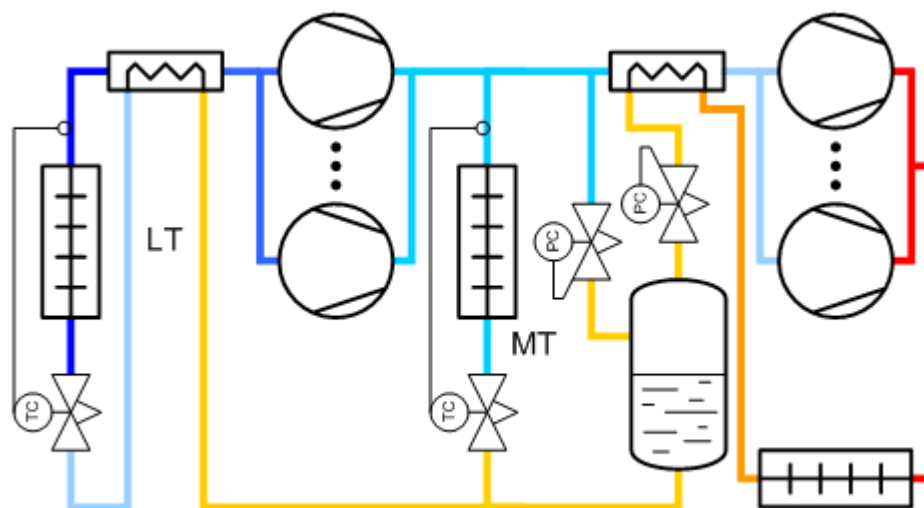


Рис. 3.8 Схема двоступінчатої транскритичної системи холодильної системи в програмі Pack Calculator

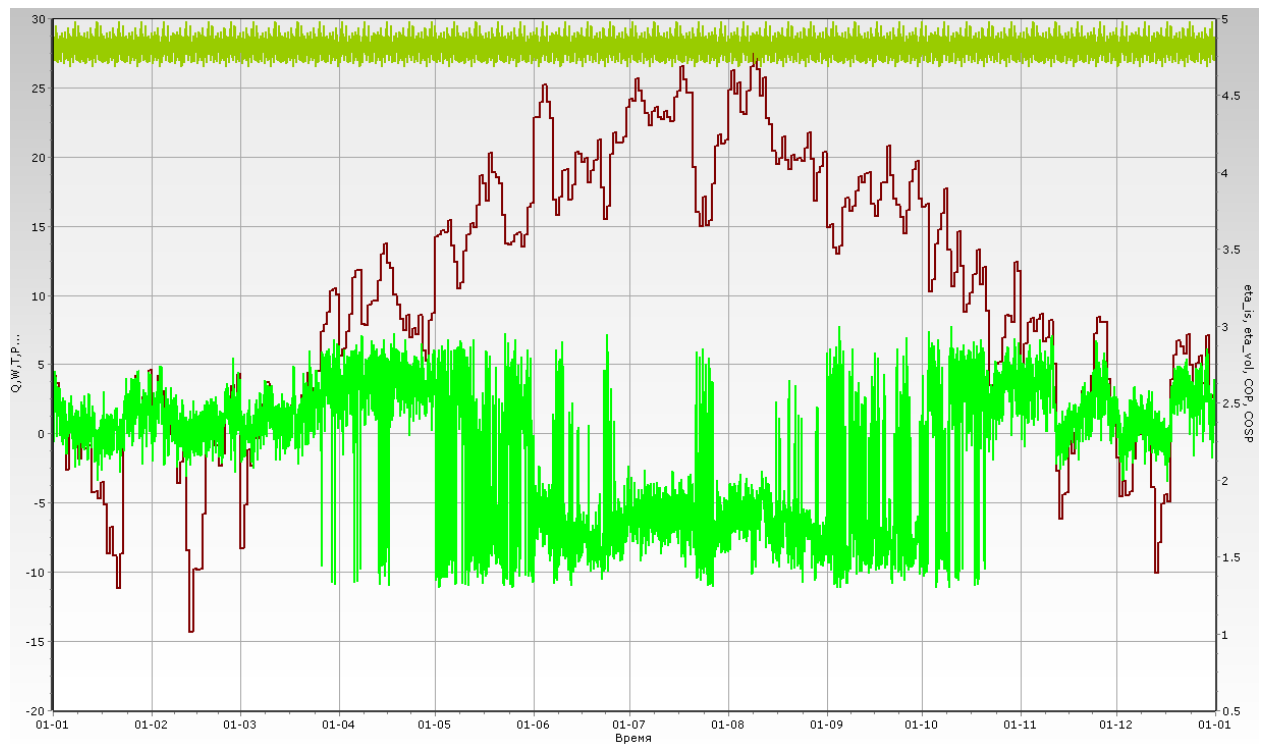


Рис. 3.9. Коефіцієнт перетворення для середньо- та низькотемпературної системи в залежності від температури навколишнього середовища.

В програмі Pack Calculator була змодельована холодильна система згідно вихідних даних наведених у главі 2. Також із додаткових функцій була передбачена система рекуперації тепла.

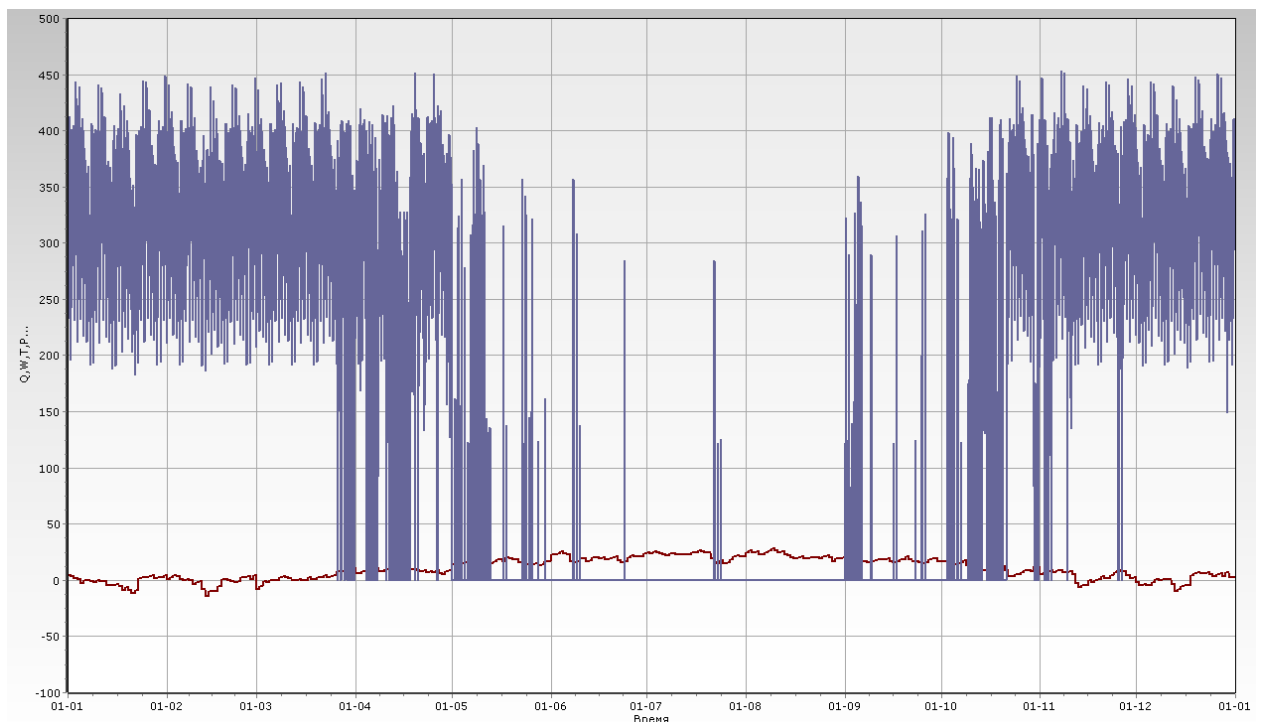


Рис. 3.10. Кількість теплоти рекуперації для середньотемпературної системи в залежності від температури навколишнього середовища.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 85   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Особливість застосованого холодоагенту показує значу залежність від температурних умов навколишнього середовища. В літній період коефіцієнт перетворення коливається від 1.4 до 2.1. Передбачена можливість рекуперації тепла дозволяю зрекуперувати від 230 до 420 кВт тепла в залежності від температури навколишнього середовища. Найнижча величина рекуперації спостерігається у літній час через високу температуру навколишнього середовища. Найбільши ефективність досягається при температурі навколишнього середовища від -7°C до +3 °C.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 86   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

## РОЗДІЛ IV Охорона праці

Питання охорони навколишнього середовища та безпеки роботи холодильних установок є одними з найбільш актуальних під час проектування холодильного обладнання та вибору холодоагенту. Застосування традиційних холодоагентів обмежується різними нормативами, причому в усьому світі спостерігається тенденція до їхньої жорсткості. Унаслідок цього останнім часом усе частіше рекомендується використовувати альтернативні холодоагенти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки важливість CO<sub>2</sub> як холодоагенту в секторі холодильного обладнання для продовольчої торгівлі помітно зростає. Найважливіше при цьому те, що CO<sub>2</sub> – один з небагатьох холодоагентів для холодильних систем, які перспективні із погляду безпеки та нешкідливості для навколишнього середовища. CO<sub>2</sub> може використовуватися як холодоагент у холодильних системах різних типів, що працюють як у докритичних (субкритичних), так і надкритичних (транскритичних) циклах. Найчастіше субкритичний цикл застосовують за каскадною схемою холодопостачання. Як правило, у верхній гілці каскаду як холодоагент використовують R717 або R134a, а в нижній – R744 (CO<sub>2</sub>) у діапазоні температур від –35 оС (температура кипіння) до +10 оС (температура конденсації), що відповідає тискам від 12 до 26,5 бар. Існують різні види субкритичних каскадних холодильних систем на CO<sub>2</sub>: системи з безпосереднім кипінням, системи з насосною циркуляцією, системи на CO<sub>2</sub> із вторинним ропним контуром або комбінації цих систем. Транскритичні холодильні системи на CO<sub>2</sub> сьогодні використовуються лише в невеликих і комерційних холодильних установках із бустер-компресором на CO<sub>2</sub> у діапазоні температур від –35 оС (температура кипіння) до +40 оС (температура конденсації), що відповідає тискам від 12 до 90 бар. Це мобільні системи кондиціювання повітря, невеликі теплові насоси та системи холодопостачання супермаркетів. Особливість транскритичної схеми в тому, що під час її роботи

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 87   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

не відбувається конденсації холодоагенту, завдяки чому досягається мінімальна різниця між температурою навколишнього середовища та температурою холодильного агента, що використовується для перенесення тепла в системі рекуперації. Ця властивість дає можливість збільшити кількість тепла, що рекуперується за умов збільшення температури навколишнього середовища. Низка компаній розробили та пропонують каскадні холодильні центральні на CO<sub>2</sub>, що використовуються для систем холодопостачання супермаркетів. Поршневі напівгерметичні компресори для CO<sub>2</sub> як холодоагенту як для субкритичного, так і для транскритичного циклів пропонують багато виробників, зокрема, такі як Danfoss, Bitzer, GEA Bock, Dorin SpA. Мета статті – аналітичний огляд сучасних систем централізованого холодопостачання на CO<sub>2</sub>, визначення переваг та недоліків систем холодопостачання торговельних підприємств із застосуванням CO<sub>2</sub> під час вибору інженерного рішення, виявлення перспективних тенденцій сучасного проектування холодильних систем торговельних підприємств. Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо особливості застосування каскадних холодильних систем на CO<sub>2</sub> для торговельних підприємств.

Ефективність субкритичних каскадних холодильних систем на CO<sub>2</sub> досить висока навіть в умовах жаркого клімату. Ці системи мають досить вагомі переваги: для високотемпературної ступені потрібно дуже невелику кількість холодоагенту; різниця температур біля каскадного теплообмінника відносно низька; на високій стороні різних холодильних установок можна використовувати фреон або аміак; аміачно-вуглекислотні каскадні системи мають найвищий коефіцієнт корисної дії. На рис. 1 показано спрощену схему холодильної установки, у якій CO<sub>2</sub> скраплюється у випарнику первинного холодильного контура (із холодоагентами NH<sub>3</sub>, HC (пропан, пропилен) або HCFC/HFC) і транспортується циркуляційною помпою безпосередньо у випарники системи середньотемпературного охолодження. У сучасних каскадних CO<sub>2</sub>-ступенях передбачений додатковий LT-ресивер низького тиску, що підтримує на рівні тиск кипіння CO<sub>2</sub> за рахунок відкачування пари

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 88   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



одним або декількома одноступінчастими компресорами. Компресор нагнітає пари CO<sub>2</sub> у каскадний охолоджувач (конденсатор) разом із газом із середньотемпературного випарника. В охолоджувачі сумарний газовий потік конденсується й потім надходить у відповідний МТ-ресивер

Розрахунковий тиск CO<sub>2</sub> засновано на доступності компонентів і він дорівнює 40–45 бар (що відповідає температурі +5...+10 оС). У таких каскадних системах важливо, щоб на високотемпературній стороні працював, принаймні, один компресор для забезпечення можливості запуску першого компресора на низькотемпературній стороні. У протилежному випадку компресор на низькотемпературній стороні буде вимикатися через високий тиск. така сама послідовність необхідна під час заповнення системи.

Насамперед необхідно заповнити фреоном високотемпературний контур і запустити його в роботу. Коли це буде зроблено, можна почати заправлення низькотемпературної системи діоксидом вуглецю. Потім за умов підвищення тиску CO<sub>2</sub> в усмоктувальній лінії запускаються низькотемпературні компресори. Транскритична бустерна холодильна система є однією з найбільш перспективних для застосування в умовах холодного та помірного клімату. Причиною цього є кілька чинників: транскритична бустерна система більш економічна в плані енергоспоживання порівняно із системами, що працюють на фреоні R404a, і в той же час вона має більш просту конструкцію. Секція високого тиску починається з компресора високого тиску LT, проходить через газоохолоджувач і закінчується клапаном регулювання високого тиску. Розрахунковий тиск у цій секції, як правило, становить від 90 до 120 бар. Секція середнього тиску починається від розширювального клапана високого тиску, де потік розділяється на газ і рідину в ресивері. Газоподібна фаза відводиться в усмоктувальну лінію компресора високого тиску МТ через байпасний клапан. Рідка фаза подається до розширювальних клапанів, де відбувається її розширення перед подачею в низькотемпературний і середньотемпературний випарники.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 89   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Газ із низькотемпературного випарника стискується в низькотемпературному компресорі та змішується з газами, що надходять із середньотемпературного випарника та байпасної лінії. Звідси газ подається в усмоктувальну лінію компресора високого тиску та заповнює контур. Розрахунковий тиск у середньотемпературній секції звичайно становить 40–45 бар, а в низькотемпературній – 20–35 бар. При цьому спостерігається тенденція проектувати середньотемпературну та низькотемпературну секції на однаковий тиск. Тиск у ресивері регулюється клапаном із кроковим двигуном. Він повинен бути вище величини тиску, за якого відбувається випарування в середьотемпературних випарниках, для забезпечення різниці тиску на середьотемпературному розширювальному клапані.

З іншого боку, цей тиск повинен бути нижче розрахункового тиску. Після розширення під високим тиском відбувається поділ газу та рідини, при цьому газ відводиться безпосередньо на усмоктувальну сторону компресора, а рідка фаза розподіляється по випарниках. Описаний процес дає можливість використовувати стандартні компоненти холодильної системи, що працюють під тиском. За транскритичних умов тиск є функцією температури на виході з газоохолоджувача. Метою регулювання є одержання максимального холодильного коефіцієнта COP за цієї певної температури.

Робота вентиляторів газоохолоджувача регулюється за температурою CO<sub>2</sub> на виході з газоохолоджувача. Якщо фактична температура нижче заданого значення, то швидкість обертання вентиляторів зменшується. Якщо всі компресори зупинені, то вентилятори не обертаються. У традиційних системах тиск часто є регулюючим параметром (зі зменшенням тиску конденсації підвищується продуктивність системи), але для транскритичних систем у холодний період це може сприяти збільшенню переохолодження та привести до сильного зниження тиску в ресивері. У результаті цього перепад тиску може бути недостатній для нормальної роботи розширювального клапана. 192 Загальною проблемою, як для субкритичних систем, так і для транскритичних є підвищення тиску під час простою системи. Для вирішення

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 90   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

цієї проблеми існує кілька способів: для підтримання тиску в холодильній установці на прийнятному рівні можна використовувати додаткову невелику холодильну машину; установити в системі розширювальну посудину, достатню для компенсації підвищення тиску в системі під час простою; проектувати систему таким чином, щоб вона могла витримувати тиск простою (тиск насичених пар за кімнатної температури) близько 80 бар.

Як показує практика, оптимальним рішенням для холодильних установок є використання невеликої холодильної установки для охолодження рідкого CO<sub>2</sub>. Важливу роль під час вибору системи холодопостачання та холодильного агента для торговельного підприємства, що проектується, відіграють первісні та експлуатаційні витрати. Більшу частину експлуатаційних витрат становить споживання електроенергії. Як відомо, для виробництва холоду в харчовій промисловості споживається значна кількість електроенергії.

### **Категорія приміщень установок та спеціальні вимоги**

1. Категорія приміщень фреонових установок (машинні відділення, холодильні камери) за вибуховою, вибухопожежною та пожежною небезпекою, за ступенем небезпеки ураження електричним струмом повинен відповідати СНиП 2.09.08-85 і вимогам ПУЕ. За вибухонебезпечності приміщення з фреоновими установками відносяться до невибухонебезпечним. За пожежонебезпеки все приміщення фреонових установок відносяться до категорії Д, за винятком холодильних камер з температурою понад 10 ° С, що відносяться до категорії В. За ступенем небезпеки ураження електричним струмом холодильні камери та машинні відділення фреонових установок відносяться до категорії приміщень з підвищеною небезпекою. При розміщенні холодильних установок в технологічних цехах з підвищеною вологістю ступінь захисту електрообладнання приймати по ГОСТ 14254-80 "Електричне обладнання напругою до 1000 В. Оболонки. Ступінь захисту. Позначення. Методи випробувань".

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 91   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

2. Електроустановки фреонових холодильних систем повинні відповідати "Правилам улаштування електроустановок" (ПУЕ), "Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів" і "Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів" (ПТЕ і ПТБ)

3. Холодильні камери з температурою 0 ° С і нижче повинні бути обладнані системою светозвукової сигналізації "людина в камері", сигнал від якої повинен надходити в приміщення з постійним чергуванням персоналу.

4. Для екстреного відключення електроживлення всього устаткування (крім аварійної вентиляції та освітлення) неагрегатированих холодильних установок (компресори, насоси, вентилятори та ін.) У одного з виходів з машинного відділення повинна бути змонтована кнопка (червоного кольору) загального аварійного відключення.

#### **Організаційні заходи**

1. Адміністрація підприємства зобов'язана забезпечити холодильні установки необхідним штатом обслуговуючого персоналу, керуючись затвердженням на підприємстві штатного розпису, "Єдиного тарифнокваліфікаційного довідника робіт і професій робітників" Держкомітету СРСР по праці та соціальних питань і в повній відповідності з діючими "Нормативами чисельності робочих холодильних установок", або укласти договір зі спеціалізованою організацією на комплексне технічне обслуговування автоматизованих холодильних установок

2. До обслуговування холодильних установок допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд і мають свідоцтво про закінчення спеціального навчального закладу або курсів по експлуатації холодильних установок — для машиністів, по автоматизації холодильних установок — для слюсарів, по контрольно-вимірювальних приладів та автоматики, по експлуатації і автоматизації холодильних установок — для електромеханіків. До самостійного обслуговування холодильних установок машиніст і електромеханік можуть бути допущені тільки після проходження

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 92   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

стажування протягом 1 міс і відповідної перевірки знань. Допуск до самостійної роботи здійснюється розпорядженням по підприємству.

3. На кожному підприємстві відповідно до діючого положення про організацію роботи з охорони праці повинні бути розроблені і затверджені головним інженером (головним спеціалістом) інструкції по експлуатації (обслуговування) холодильного обладнання з урахуванням заходів з охорони праці. Інструкції повинні бути затверджені профспілковим комітетом підприємства і доведені до обслуговуючого персоналу (під розписку).

4. На кожному підприємстві наказом повинні бути призначені: особа, відповідальна за справний стан, правильну і безпечну експлуатацію холодильних установок, і особа, відповідальна за реєстрацію холодильних апаратів (судин), нагляд за ними і їх технічний огляд.

5. Адміністрація підприємства зобов'язана проводити відповідно до ГОСТ 12.0.004-79 навчання робітників, інженерно-технічних працівників і службовців безпеки праці, а також здійснювати контроль за своєчасністю і якістю навчання працюючих. Загальне керівництво і організація навчання в цілому по підприємству покладаються на керівника підприємства, а в підрозділах - на керівника підрозділу

6. Періодична перевірка знань обслуговуючого персоналу з технічного обслуговування холодильної фреонової установки, техніці безпеки, інструкцій з експлуатації обладнання та охорони праці, практичних дій з надання долікарської допомоги повинна проводитися не рідше одного разу на рік комісією, що складається з фахівців по холодильній техніці, електротехніці і техніці безпеки. Склад комісії затверджується керівництвом підприємства. Результати перевірки заносяться в журнал, а також в посвідчення і підписуються членами комісії

7. Перевірка знань з техніки безпеки керівних і інженерно-технічних працівників повинна здійснюватися відповідно до "Положення про порядок перевірки знань правил і норм з охорони праці та техніки безпеки керівних,

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 93   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

інженерно-технічних працівників і фахівців організацій і підприємств системи Держагропрому СРСР".

8. Персонал, допущений до технічного обслуговування конкретної холодильної установки, крім загальнотеоретичних знань, повинен знати наступне.

**машиністи:**

Її пристрій, обслуговування, принцип роботи, системи фреонових, водяних і ропних трубопроводів, порядок виконання робіт з пуску, зупинці, регулювання режиму роботи установки і її елементів відповідно до заводських інструкцій з обслуговування встановленого обладнання; нормальний режим роботи холодильної установки; правила заповнення установки холодильним агентом і маслом.

**Слюсарі по КВП і А :**

правила безпечної роботи з електроустановками; пристрій, обслуговування, принцип дії і наладку приладів автоматики, щитів і пультів, системи автоматизації та захисту компресорів і насосів від небезпечних режимів роботи і аварій; принцип роботи холодильної установки.

**Електромеханіки:**

пристрій, обслуговування, регулювання і правила ремонту як холодильної установки, так і електроустановки, а також системи автоматизації та захисту обладнання від небезпечних режимів роботи і аварій. Обслуговуючий персонал повинен, крім того: знати порядок ведення добового журналу роботи холодильної установки; вміти користуватися засобами індивідуального захисту, знати відповідні правила техніки безпеки та правила надання долікарської допомоги, в тому числі при ураженні електрострумом.

9. Конструкція апаратів (судин), їх експлуатація, а також реєстрація й огляд підприємствами-власниками (або організацією, яка обслуговує холодильну установку) повинні відповідати вимогам "Правил будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском" Держгіртехнагляду

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 94   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

СРСР. Апарати (судини) холодильних установок не підлягають реєстрації та огляду органами Держгіртехнагляду СРСР

10. У машинному відділенні повинні бути вивішені на видному місці інструкції по: влаштування і безпечної експлуатації холодильної установки; обслуговування машин і апаратів; діям персоналу при виникненні аварійної ситуації; пожежної безпеки; надання першої долікарської допомоги; охорони праці, а також: графіки проведення планово-попереджувального ремонту (періодичного технічного обслуговування); затверджені головним інженером (головним спеціалістом) схеми трубопроводів холодоагенту (холодильного агента), хладоносителя і води з нумерацією в них (і відповідно в натурі) запірної арматури і приладів контролю і автоматики; покажчики знаходження засобів індивідуального захисту; номери телефонів швидкої допомоги, пожежної команди, диспетчера електромережі; номер телефону та адресу організації, яка обслуговує автоматизовану холодильну установку. Для машинних відділень, де встановлені тільки агрегатовані холодильні машини заводської поставки, які обслуговуються спеціалізованою організацією, перелік вищевказаних інструкцій і матеріалів, а також їх місцезнаходження встановлюються керівництвом підприємства.

11. У разі внесення змін до системи холодильної установки схема холодильних трубопроводів, вивішена в машинному відділенні, повинна бути виправлена.

12. Машинне відділення холодильної установки повинно бути забезпечено первинними засобами пожежогасіння (для категорії виробництва 3) відповідно до діючих "Типових правил пожежної безпеки для промислових підприємств", затвердженими ДУПО МВС СРСР. Розміщення і зберігання в машинному відділенні сторонніх предметів не допускається.

13. Вхід стороннім особам у машинне відділення забороняється, про що повинна бути вивішена попереджувальний напис біля входних дверей і заборонний знак безпеки згідно з ДСТУ ISO 6309: 2007

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 95   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

14. Виконання робіт в машинних відділеннях, а також в холодильних камерах особами, не пов'язаними з обслуговуванням холодильної установки і експлуатацією камер (ремонт приміщення, теплоізоляція, фарбування обладнання та труб та ін.), Повинно проводитися після відповідного інструктажу і під наглядом особи, відповідальної за експлуатацію холодильної установки (або особи, що його замінює). Допущення до роботи особи повинні бути проінструктовані про небезпечні наслідки пошкодження елементів холодильних установок, про неприпустимість використання обладнання та труб в якості опор для робочих майданчиків (помостів), сходів і засобів підйому матеріалів та про заборону куріння в приміщеннях.

15. Розслідування нещасних випадків має здійснюватися відповідно до чинного "Положення про розслідування та облік нещасних випадків на виробництві", затвердженого Президією ВЦРПС.

16. Прийом в експлуатацію знову змонтованої або реконструйованої холодильної установки повинен проводитися відповідно до СНиП 3.05.05-84 "Технологічне обладнання і технологічні трубопроводи" та СНиП III-3-81 "Прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів. Основні положення".

#### **Вимоги безпеки під час роботи**

Необхідно виконувати тільки ту роботу, що поручена вам керівником робіт.

1. Не вмішуватись в роботу інших, якщо це не доручено адміністрацією.

2. Бути уважним в роботі, не відволікати від роботи розмовами інших та не дозволяти це робити іншим.

3. Не працювати без належного освітлення.

5. Не допускати присутності в робочій зоні присутності посторонніх осіб.

При експлуатації холодильного устаткування:

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 96   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



- завантаження охолоджуваного об'єму холодильного устаткування здійснювати після пуску холодильної машини і досягнення температури необхідною для зберігання продуктів;

- кількість завантажуваних продуктів не повинна перевищувати норму, на яку розрахована холодильна камера;

- двері холодильного устаткування відкривати на короткий час і як можна рідше;

- при осіданні на охолоджуваних приладах (випарниках) інею (снігової шуби) товщиною більше 5 мм зупинити компресор, звільнити камеру від продуктів і виконати відтавання інею (снігової шуби);

- при виявленні витoku холодогенту холодильне устаткування негайно відключити, приміщення провітрити; **не допускається:**

- включати агрегат за відсутності захисного заземлення або занулення електродвигунів;

- працювати без огорожі машинного відділення, з несправними приладами автоматики;

- захарашувати простір біля холодильного агрегату складувати товари, тару і інші сторонні предмети;

- торкатися до жвавих частин включеного в електричну мережу агрегату, незалежно від того, знаходиться він в роботі або в режимі автоматичної зупинки;

- зберігати продукти на випарниках; видаляти іній з випарників механічним способом за допомогою скребоків, ножів;

- розміщувати сторонні предмети на огорожах агрегату;

- завантажувати холодильну камеру при знятій огорожі

повітряохолоджувача, без піддону випарника, а також без піддону для стоку конденсату;

- самовільно пересувати холодильний агрегат.

6. Виключити користуватися холодильним устаткуванням, якщо:

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 97   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

- струмонесучі частини магнітних пускачів, рубильників
- електродвигунів, приладів автоматики не закриті кожухами;
- холодильні машини не мають захисного заземлення або занулення металевих частин, які можуть виявитися під напругою при порушенні ізоляції;
- закінчився термін чергового випробування і перевірки ізоляції електропроводів і захисного заземлення або занулення устаткування;
- зняті кришки магнітних пускачів, клемних коробок електродвигунів, реле тиску і інших приладів;
- виявлено порушення температурного режиму, іскріння контактів часте включення і виключення компресора і т. п.

### **Вимоги безпеки у аварійних ситуаціях 1**

Надання долікарської допомоги.

2. Якщо потерпілий не втратив свідомість та продовжує дихати та в нього нормально працює серце, необхідно вкласти його, розтебнути одяг, та надати повний спокій до прибуття медичної допомоги.

3. При відсутності у потерпілого дихання та пульсу необхідно проводити йому штучне дихання та закритий масаж серця. Під час долікарської допомоги необхідно слідкувати за зіницями очей, широкі зіниці вказують на різке погіршення кровообігу мозку. При такому стані необхідно оживлення розпочинати негайно.

4. Якщо в потерпілого відсутнє дихання, пульс то оживлення необхідно робити в такому порядку:

Покласти потерпілого на спину і під його локті підкласти валік з звернутого одягу.

Присісти з лівої сторони від потерпілого, свою ліву руку піднести під потилицю та відкинути голову потерпілого назад.

Відкрити потерпілому рот, звільнити його від слизу при допомозі марлі чи носового платка і зробивши 2-3 вдоха вдувати через марлю чи платок повітря з свого рота в рот потерпілого.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 98   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Звільнити рот та ніс потерпілого по закінченню вдування, щоб не заважати вільному видоходу. Після видоходу надаючий допомогу знову повинен зробити 2-3 глибоких штучних вдихів потерпілому. Частота штучного дихання не повинна перевищувати 12-16 разів в хвилину

5. При появі перших слабких вдихів у потерпілого самостійного дихання, деякий час необхідно продовжувати штучний вдих в момент початку самостійного вдоха потерпілого.

6. При відновленні у потерпілого самостійного дихання, деякий час необхідно продовжувати робити штучне дихання до повного приведення потерпілого в свідомість чи до прибуття лікаря.

7. Зовнішній(прямий) масаж серця необхідно проводити шляхом ритмічного зжаття серця через передню стінку грудної клітки при надавлюванні на відносно подвижну нижню частину грудини з частотою 60-70 разів на хвилину, це забезпечує достатній кровообіг в організмі при відсутності роботи серця.

8. Оживлення не можна зупиняти навіть якщо потерпілий не подає ознак життя. Тільки лікар може вирішити чи помер потерпілий.

9. При наданні допомоги потерпілому не можна допускати охолодження тіла, залишати його на сирій землі, на кам'яному, бетонному чи металевому полу. Під потерпілого необхідно підстелити щось тепле та при можливості зігрівати його.

10. Необхідно вивчити прийоми надання першої допомоги при ураженні електрострумом та вміти їх надавати.

11. При задусі та отравленні необхідно поперед всього не допускати дальнішу дію газу на потерпілого, швидко вивести чи винести його з загазованого приміщення на чисте повітря чи провітрюєме приміщення.

12. До приходу лікаря у випадках гострого отруєння чи задухи газом необхідно освободити потерпілого від стискуючого одягу.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 99   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

13. Якщо потерпілий втратив свідомість ,його необхідно вкласти на рівне місце дати понюхати нашатирний спирт ,коли він прийде до свідомості надати йому спокій.

14. Якщо потерпілий в свідомості ,дати йому міцний чай чи кофе. Якщо тіло холодне, зігріти грілками чи розтиранням .Слідкувати щоб потерпілий не заснув.

15. Необхідно вміти надавати першу медичну допомогу при опіках тому ,що всякий опік-це рана в яку легко потрапляє інфекція .Для попередження цього на опік накладається стерильна пов'язка.

16. Не можна знімати з обпеченого місця одяг та обдирати прилипший натільний одяг

17. При тяжких обширних опіках ,при котрих може наступити шок, необхідно загорнути потерпілого в чисту просиню, вкласти та забезпечити максимальний спокій та до прибуття лікаря давати потерпілому пити солодкий чай чи кофе.

18. При опіку очей електричною дугою необхідно робити холодні примочки розчином борної кислоти.

19. При обмороженні необхідно відігріти потерпілому обморожену частину тіла до +37 градусів шляхом розтирання теплою суконкою чи теплою рукавичкою до покрасіння кожного покрову ,потім змазати обморожену частину тіла несоленим жиром чи вазеліном.

20. Надавати першу медичну допомогу при переломах та вивихах в першу чергу потрібно придати потерпілому зручне положення, що запобігає пошкодженню частини тіла .Це може бути досягнуто при допомозі накладення шин.

21. При відсутності шин використовувати любі підручні засоби-доски ,палки ,шматки картону,фанери і т.д. Шини необхідно прикріплювати до кінцівок бинтом ,ременем чи вірьовкою.

22.Для попередження засорення рани при відкритому переломі

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 100  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

,поверхню кожного покриву навколо рани слід змазати йодною настоякою ,накласти стерильну пов'язку та відправити потерпілого до лікарняного закладу.

23. Надаючий першу медичну допомогу при пораненнях повинен чисто вимити руки з милом, чи протерти пальці йодною настоякою.

24. На можна очищати рану від грязі ,пилу ,землі крові ,та промивати водою ,це може зробити тільки лікар .Пам'ятай ,що кожне поранення небезпечно можливою втратою крові, та зараженням рани.

25. Для надання допомоги необхідно відкрити індивідуальний стерильний перев'язувальний пакет ,покласти стерильний матеріал на рану та зав'язати бинтом.

26. У випадку відсутності індивідуального пакета перев'язати рану бинтом. ,марлею, чи чистою тряпкою.Поверхню кожного покриву змазати йодною настоякою.

27. Кровотечу необхідно зупиняти при допомозі давлючої пов'язки, для цього рану закривають стерильним матеріалом та щільно забинтовують.

28. При сильній кровотечі необхідно здавлювати кровоносні судини при допомозі жгута ,при цьому необхідно пам'ятати ,що жгут більш 1,5-2 години не можна тримати.

29. Оберігатись електропроводів що можуть звисати з стіни(підлоги.)

30.При виявленні обриву чи ненадійного кріплення заземлюючого провода, пошкоджених електроустановок,оголених проводів,повідомити керівнику робіт і не включати електроустановки в роботу до усунення несправності.

Категорично забороняється усувати несправності електрообладнання чи електропроводки самому,ремонт та технічне обслуговування електрообладнання дозволяється проводити електротехнічному персоналу.

31. При виникненні пожежі зняти вогнегасник та привести його в робочий стан та направити на місце загорання.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 101  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

32. При припиненні подачі електроенергії, при появі сторонніх шумів вібрації, диму, аварії і т.д. негайно відключити обладнання і повідомити керівника робіт.

33. При виникненні пожежі негайно повідомити про це керівника робіт чи іншу адміністративну особу підприємства, подати сигнал тривоги і приступити до гасіння пожежі.

34. При гасінні пожежі в першу чергу необхідно гасити вогнище з допомогою вогнегасника, направляючи струмінь під кутом 10-45 градусів, гасити з одного краю вогнища переміщуючись до іншого.

35. Електрообладнання що загорілось, слід негайно відключати і гасити піском, порошковим та вуглекислотним вогнегасником.

36. При загоранні одягу його необхідно зірвати та погасити.. При загоранні значної частини одягу людину загортають у ковдру чи іншу тканину (але не з головою) і гасять полум'я.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 102  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

## РОЗДІЛ V Економічна частина

Економічне обґрунтування проекту. Класифікаційна оцінка різновиду проекту.

клас – монопроект;

тип – технічний;

вид – дослідницько-освітній;

тривалість – короткостроковий;

складність – простий;

рівень – галузевий.

Визначення мети й результатів проекту.

Мета – дослідження і розробка каскадної холодильної машини працюючої на вуглекислоті і пропанові.

Результати:

- а) розрахунки вартості розробки і дослідження каскадної машини ;
- б) установка, монтаж, налагодження й перевірка ситеми холодильного обладнання;
- в) технічна документація й паспорт, посібник з експлуатації.

Життєвий цикл проекту:

Фаза концепції проекту:

- а) збір даних і аналіз сучасного стану на ринку робочих тіл;
- б) установлення потреби в результатах;
- в) твердження концепцій.

Фаза розробки:

- а) установлення ділових контактів і вивчення цілей, мотивів і вимог замовника й власника;
- б) розвиток концепцій, планування предметної області й інших елементів проекту;
- в) розробка зведеного плану.

|      |      |          |        |      |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
|      |      |          |        |      |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  | 103  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

Фаза реалізації:

- а) організація виконання робіт;
- б) детальне проектування й технічні специфікації;
- в) інформаційний контроль над виконанням робіт;
- г) керівництво й координація робіт, регулювання основних показників проекту;
- д) підтвердження закінчення робіт.

Фаза завершення:

- а) експлуатаційні випробування остаточного продукту проекту;
- в) підготовка документів і здача холодильної установки замовникові;
- г) оцінка результатів проекту й підведення підсумків;
- д) підготовка підсумкових документів і закриття проекту.

Визначення навколишнього середовища проекту (зовнішнє, внутрішнє) і учасників проекту.

Учасники:

- 1) замовник проекту;
- 2) команда проекту;
- 3) керівник проекту;
- 4) контрагенти проекту;
- 5) рецензори проекту;
- 6) органи влади;
- 7) виробники й споживачі кінцевого продукту.

Зовнішні фактори:

- політична стабільність; підтримка проекту урядом;
- джерела інвестицій і капітальних вкладень;
- тарифи й податки; рівень цін; рівень життя й умови;
- відношення місцевого населення до проекту;
- рівень розвитку фундаментальних і прикладних наук;
- рівень інформаційних технологій і комп'ютеризації;

|      |      |          |        |      |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
|      |      |          |        |      |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  | 104  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |



- енергетичні системи;

Внутрішні фактори:

- постачальники ресурсів ;
- розвиток банківської структури ;
- засобу масової інформації.

Економічний розрахунки.

Метою цього розділу є техніко-економічна оцінка пропонованого об'єкту й доведення економічної доцільності запропонованого варіанту.

Розрахунки капітальних вкладень.

Капітальні витрати складаються з витрат на устаткування, розробку проекту й витрат на матеріали(вуглекислота, пропан).

$$K = C_{об} + C_{ниш} + C_{мат}, \text{ грн,}$$

де:  $C_{об}$ - вартість обладнання;

$C_{ниш}$ -вартість наукових досліджень;

$C_{мат}$  – вартість матеріалів.

1) Вартість устаткування визначаємо по прейскуранту й зводимо в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 «Вартість устаткування»

| №<br>п/п                      | Найменування устаткування і<br>його характеристика | Од.вим                     | Кіл-ть | Вартість<br>од.обл.(євро) | Загальна<br>вартість<br>обл.(євро) |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|--------|---------------------------|------------------------------------|
| 1                             | Компресор                                          | шт                         | 4      | <b>60-70 тис</b>          | <b>130000</b>                      |
| 2                             | Конденсатор                                        | шт                         | 2      | <b>9250</b>               | <b>18500</b>                       |
| 3                             | Теплообмінник                                      | шт                         | 2      | <b>2050</b>               | <b>4100</b>                        |
| 4                             | Конденсатор - випаровувач                          | шт                         | 1      | <b>3000</b>               | <b>3000</b>                        |
| Сумарна вартість устаткування |                                                    | 155600 євро (4473500 грн.) |        |                           |                                    |

|      |      |          |        |      |             |
|------|------|----------|--------|------|-------------|
|      |      |          |        |      | Арк.<br>105 |
|      |      |          |        |      |             |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |             |

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| Вартість іншого обладнання 10%     | 447350 грн.  |
| Розрахункова вартість устаткування | 4473500 грн. |
| Витрати на впакування, тран-ку 15% | 671025 грн.  |
| Витрати на монтаж 20%              | 894700 грн.  |
| Усього вартість устаткування       | 6486575 грн. |

Тоді капітальні вкладення по проекту складуть:

$$K_{\text{хол}} = 447350 + 4473500 + 671025 + 894700 = 6486575 \text{ грн};$$

Розрахунки експлуатаційних витрат.

Розрахунки собівартості виробництва тепла.

Розрахунки витрат по статті "Допоміжні матеріали .

До допоміжних матеріалів відносяться:

а) холодильний агент;

б) змащувальні матеріали,

Розрахунки вартості річного споживання холодильного агенту.

$$C_{\text{з.а.}} = G_a \cdot C_A, \text{ грн},$$

де:  $G_a$  - річне поповнення системи холодильним агентом, т;

$C_A$  - ціна холодильного агента за 1т, грн/т;

Річне споживання холодильного агенту при ремонті.

$$G_a = \frac{q_{\text{х.а.}} \cdot Q_{\text{от}} \cdot k'}{1000}, \text{ т},$$

де:  $k'$  - коефіцієнт враховуючий втрати холодильного агента при ремонтних роботах;

$q_{\text{х.а.}}$  - питома норма витрати холодоагенту, кг/1000 кДж;

$$G_a = \frac{0,00043 \cdot 3,4 \cdot 10^8 \cdot 1,2}{1000} = 175,5 \text{ кг};$$

|      |      |          |        |      |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
|      |      |          |        |      |  | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  | 106  |

$$C_{z.a.} = 175,5 \cdot 1100 = 193.050 \text{ грн};$$

Розрахунки вартості річного споживання мастильних матеріалів.

$$G_m = \frac{(q_m \cdot z \cdot t) \cdot t / t'}{1000}, \text{ Т},$$

де: z - сумарна кількість компресорів;

$q_i$  - норма часового витрати масла на, кг;

t - річний час роботи компресора, година;

t' - нормативний час через яке повинне мінятися масло (у середньому раз у рік);

$$C_{m.} = G_m \cdot \Pi_m, \text{ грн},$$

де:  $\Pi_m$  - вартість 1т мастильних матеріалів, грн/т;

$$G_m = \frac{(0,012 \cdot 4 \cdot 5528) \cdot 5528 / 10000}{1000} = 0,147 \text{ Т};$$

$$C_{m.} = 0,147 \cdot 115000 = 16905 \text{ грн};$$

Розрахунки витрат по статті "Допоміжні матеріали" зводимо в табл. 5.2

Таблиця 5.2 "Допоміжні матеріали".

| №<br>пп                         | Стаття витрат                  | Витрати, грн |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------|
| 1                               | Вартість холодильного агента   | 193050       |
| 2                               | Вартість мастильних матеріалів | 16905        |
| РАЗОМ                           |                                | 209955       |
| Інші невраховані витрати (0,5%) |                                | 10498        |
| УСЬОГО                          |                                | 220453       |

Розрахунки витрат по статті "Електроенергія".

Розрахунки річних витрат на електроенергію робимо по наступній залежності:

$$C_{z.эл.} = N_y \cdot n_z \cdot n_3 \cdot n_{дон} \cdot T \cdot \Pi_{эл.}, \text{ грн},$$

де:  $N_y$  - установлена потужність холодильної установки, кВт;

|      |      |          |        |      |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
|      |      |          |        |      |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  | 107  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

$n_z, n_{\text{э}}, n_{\text{дон}}$  - коефіцієнти завантаження електродвигуна по потужності, облік витрат електроенергії в межах підприємства,  $n_{\text{с}} = 0,85$ ;  $n_{\text{з}} = 1,06$ ;

$T$  - річний фонд робочого часу ХУ, година за рік.

$\Pi_{\text{эл}}$  - тариф за 1 кВт-ч споживаної енергії, грн/кВт·ч;

$$C_{\text{ел}} = 172,8 \cdot 0,85 \cdot 1,06 \cdot 3132 \cdot 1,68 = 819219 \text{ грн.}$$

Амортизація встаткування .

Амортизація встаткування (15% від вартості встаткування):

$$C_{\text{а.об}} = \frac{C_{\text{об}} \cdot 15}{100} = \frac{4473500 \cdot 15}{100} = 671025 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт устаткування.

Ухвалюються в розмірі 5,5% від вартості встаткування

$$C_{\text{тр}} = 4473500 \cdot 0,055 = 246043 \text{ грн.}$$

Усі статті витрат зводимо в табл. 5.3. Таблица

### 5.3 Калькуляція собівартості холоду.

| №<br>п/п | Статті витрат              | Сума, грн |
|----------|----------------------------|-----------|
| 1        | Допоміжні матеріали        | 220453    |
| 2        | Електроенергія             | 819219    |
| 3        | Амортизація встаткування   | 671025    |
| 4        | Витрати на поточний ремонт | 246043    |
| РАЗОМ:   |                            | 1956740   |

Розрахунки експлуатаційних витрат по об'єкту.

Включає наступні статті витрат:

1. Виробництво холоду.

2. Невраховані витрати

Ухвалюються в розмірі 10% від вищезгаданих витрат.

1. Виробництво холоду : 1956740 грн.

2. Невраховані витрати: 195674 грн.

|      |      |          |        |      |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
|      |      |          |        |      |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  | 108  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

РАЗОМ:  $(C_{\text{пр}} + C_{\text{н}}) = 2152414$  грн.

Розрахунки річного економічного ефекту.

Величина економічного ефекту від впровадження каскадної установквки,  
у порівнянні з установкою на каскаді фреон - фреон.

$$\mathcal{E}_r = (C_1 - C_2) - E_H (K_2 - K_1)$$

$\mathcal{E}_r$  -економічний ефект від реалізації проекту,

$C_1, C_2$  - річні поточні витрати, для установки на фреонах і CO2-пропан  
відповідно,

$C_1 = 4473500 + 58938 = 4532438$  грн. (річні поточні витрати для проекту  
каскадної схеми фреон-фреон містять у собі : всі затрати на аналогічну  
установку і вартість РТО2)

$C_2 = 4473500$  грн. (річні поточні витрати для проекту на базі досліджуваної  
схеми)

$K_1, K_2$  - капітальні витрати,

$K_1 = 6486575$  грн.(капітальні витрати на устаткування, його установку,  
монтаж, налагодження установки працюючої на фреонах).

$K_2 = 6401115$  грн.( капітальні витрати для проекту на базі досліджуваної  
машини ).

$E_H$  - нормативний коефіцієнт економічної ефективності,

$$E_H = 0,2$$

$$\mathcal{E}_r = (4532438 - 4473500) - 0,2(6486575 - 6401115) = 17092 \text{ грн}$$

Висновок.

Економічний розрахунок каскадної холодильної установки працюючої  
на парі холодильних агентів вуглекислота – пропан показує її економічну  
ефективність, порівняно із аналогічною на фреонах, в розмірі 17092 грн в рік.  
Хоча дана сума є несуттєвою (3,8% сумарних капітальних затрат) доцільність  
її розробки аргументується мінімальним впливом на екологію.

|      |      |          |        |      |             |
|------|------|----------|--------|------|-------------|
|      |      |          |        |      | Арк.<br>109 |
|      |      |          |        |      |             |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |             |

## Висновки

Найбільший показник холодильного коефіцієнту є для системи з ежектором та каскадної системи. Відповідно до наведеного вище аналізу, втрати при дроселюванні займають значну частину в загальній частці втрат в процесах холодильного циклу. Оскільки дроселювання це процес розширення робочої речовини без здійснення зовнішньої роботи, доцільно було б використовувати пристрій, який дозволяв б повертати частину роботи назад в цикл, тим самим зменшуючи втрати. Ідеальним рішенням даної проблеми стало б застосування детандера, однак, у порівнянні з застосовуваними розширювальними пристроями (теплорежуючі вентилі, електричні регулюючі клапани, капілярні трубки, дросельні шайби) конструкція детандера складніше і його застосування збільшує капітальні витрати.

Як альтернативне рішення для циклів із застосуванням CO<sub>2</sub> застосовується ежектор замість регулюючого вентиля РВЗ.

Конструкція каскадних холодильних систем включає в себе нижній каскад з CO<sub>2</sub> в якості холодоагенту (парокомпресійний цикл в докритичній області) для холодопостачання низькотемпературних споживачів і верхній каскад з R134a (найбільш поширений холодоагент) для холодопостачання середньотемпературних споживачів і для конденсації пари CO<sub>2</sub> нижнього каскаду .

Особливість застосованого холодоагенту показує значу залежність від температурних умов навколишнього середовища. В літній період коефіцієнт перетворення коливається від 1.4 до 2.1. Передбачена можливість рекуперації тепла дозволяю зрекуперувати від 230 до 420 кВт тепла в залежності від температури навколишнього середовища. Найнижча величина рекуперації спостерігається у літній час через високу температуру навколишнього середовища. Найбільши ефективність досягається при температурі навколишнього середовища від -7°C до +3 °C.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 110  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

## Список використаної літератури

1. Чумак І.Г. Холодильні установки. Проектування. Третє видання /І.Г. Чумак, В. П. Чепурненко, С. Ю. Лар,янівський та інш.//Вид. “Друк”, 2007
2. Цуранов О. А., Крисін А. Г. Холодильна техніка і технологія./під ред.. проф.. В.А. Гуляєва // СПб Лідер, 2004-448 ст.
3. Морозюк Т. В. /Теорія холодильних машин і теплових насосів./ Морозюк Т.В.//Одеса, Студія “Негоциант”, 2006 – 712 ст
4. [http://www.linde-gas.com/en/products\\_and\\_supply/refrigerants](http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants)
5. <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.ru/refrigerants/industrialrefrigeration/co2/#/>
6. Heller L, Farago T Comptes Rendus du IX Congres du Refrigeration, v 1, p 3203, Paris 1955
7. Gay N.H., 1931, Refrigerating system, US Patent 1,836,318
8. <http://leg.co.ua/knigi/pravila/pravila-tehniki-bezopasnosti-na-freonovyhholodilnyh-ustanovkah.html>
9. Сильман А.С. Пароводяные эжекторные холодильные машины. [Текст]/ Сильман А.С., Шумелишский М.Г. // Лег. и пищ. промышленность. – М., 1984. – С.272.
10. E. I. Sokolov, Zinger N M., 1989 Jet devices, Energia, Moskow, pp 352.
11. Kirillin V.A., i dr. Texnicheskaya termodinamika (4e izd., E'nergoatomizdat, 1983)
12. Badylkes, I.S., Danilov R.L., 1961, Cooling systems using steam-jet devices as a booster compressors, Energia, Moscow, pp 30.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 111  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |

13. Buyadgie, Dmytro; Sechenyh, Vitaliy; and Nichenko, Sergii, "Booster VaporCompression Refrigerating Systems" (2010). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1062.
14. Elbel, Stefan and Hrnjak, Predrag, "Ejector Refrigeration: An Overview of Historical and Present Developments with an Emphasis on Air-Conditioning Applications" (2008). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 884.
15. D.I. Buyadgie, I. D. Buyadgie, I. C. Vavilov, S.Z. Zhadan, B.S. Lineckii, V.A. Petrenko, R. L. Snejnoi, 1976. The method of cooling the metal foundry forms. No: 531649, Patent of USSR.
16. D.I. Buyadgie. Conceptual design of Ejector Refrigeration Units. Report presented on EUROTHERM Seminar Nr.85, 7-9 September 2008.
17. Буяджи, О.Д. Підвищення ефективності процесів термотрансформації в автономних ежекторних холодильних машинах [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.14 "Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування" / Олексій Дмитрович Буяджи ; наук. кер. С.В. Артеменко; Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса : ОНАХТ, 2016. – 21 с.
18. Холодильні установки спеціального призначення: конспект лекцій [Електронний ресурс] / О. С. Подмазко, Н. О. Піщанська ; Каф. холодильних установок і кондиціонування повітря. — Одеса: ОНТУ, 2023. — 99 с. — Електрон. текст. Дані.
19. Методичні вказівки та примірний розрахунок по курсовому та дипломному проектуванню з дисципліни "Холодильні машини і установки спеціального призначення" [Електронний ресурс] / О. С. Подмазко; Каф. холодильних установок і кондиціонування повітря. — Одеса: ОНАХТ, 2019. — 34 с. — Електрон. текст. дані.
20. Магістерська робота [Електронний ресурс] : метод. вказівки до виконання та оформлення роботи для студентів спец. 142 "Енергетичне машинобудування" галузі знань 14 "Електрична інженерія" ден. та заоч. форм навчання / Л. І. Морозюк, М. Г. Хмельнюк, О. В. Зімін ; відп. за вип. Л. І. Морозюк. — Одеса, 2021. — 20 с.

|     |      |          |        |      |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|--|------|
|     |      |          |        |      |  | Арк. |
|     |      |          |        |      |  | 112  |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |      |