

Шифр  
«Вуглекислота»

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ВУГЛЕКИСЛОТНИХ  
УСТАНОВОК

2019

## АНОТАЦІЯ

до науково-дослідницької роботи під шифром «Вуглекислота»

**Актуальність:** застосування традиційних холодоагентів обмежується кліматичними нормативами, тому природні речовини, наприклад діоксид вуглецю все більше використовуються.

**Мета:** визначити фактори, що впливають на вибір робочої речовини та провести аналіз особливостей роботи вуглекислотного холодильного обладнання.

**Завдання:** розглянути переваги та недоліки вуглекислотного холодильного обладнання в порівнянні з традиційними.

**Методика дослідження:** аналітичне порівняння показників холодильного обладнання з різними робочими речовинами.

**Загальна характеристика:** в роботі виконана всестороння оцінка використання різних холодильних агентів. Показано, що діоксид вуглецю є найліпшою альтернативою традиційним холодоагентам.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналітичний огляд .....	5
1.1 Основні характеристики.....	5
1.2 Екологічність і безпека.....	7
1.3 Критерій вибору холодоагентів.....	10
1.4 Тиск в холодильних системах на CO <sub>2</sub> .....	14
1.5 Субкритичні каскадні системи на CO <sub>2</sub> .....	15
1.6 Транскритичні системи на CO <sub>2</sub> .....	16
1.6.1 Проста конструкція транскритичної системи.....	16
1.6.2 Транскритична бустерна система .....	17
Висновки .....	19
Список використаної літератури.....	20

## ВСТУП

Зміна клімату стало одним з найсерйозніших викликів, з яким стикається людство. Без всякого сумніву, питання охорони навколишнього середовища і безпеки є одними з найбільш актуальних при розробці холодильного обладнання. Чи може холодильна галузь внести свій вклад в захист екології? Насправді, це вже відбувається шляхом впровадження більш ефективного обладнання і вдосконалених алгоритмів управління. Крім того, в холодильній і кліматичній техніці після освоєння необхідного рівня технологій простежується глобальна тенденція підвищення енергоефективності систем завдяки поверненню до застосування природних холодоагентів, до яких відноситься і переживає своє друге відкриття CO<sub>2</sub>. Відомо, що визначальними факторами, що впливають на вибір робочої речовини для холодильних систем, є його вартість, енергоефективність, екологічність, безпеку і існуюче законодавство.

Вартість популярних на сьогоднішній день холодоагентів ДФУ в десятки разів перевищує вартість природних холодоагентів, в тому числі CO<sub>2</sub>. При цьому різниця у вартості між природними і штучними холодоагентами продовжує неухильно зростати. Використання дорогих фреонів значно підвищує витрати на первинну заправку холодильних установок і істотно збільшує витрати на їх подальше обслуговування. Крім цього, природні холодоагенти залишаються найдоступнішими в багатьох країнах світу.

Завдяки природному походженню CO<sub>2</sub> не впливає на руйнування озонового шару Землі і надає мінімальний вплив на розвиток штучного парникового ефекту. Цей холодоагент має нульову озоноруйнуючі здатність (ODP = 0) і мінімальний потенціал глобального потепління (GWP = 1), що в тисячі разів менше в порівнянні з поширеними сьогодні ДФУ холодоагентами. Крім усього іншого, обмеження використання небезпечних для навколишнього середовища робочих речовин підтримується відповідними міжнародними угодами і в ряді випадків національним законодавством.

Досвід багатьох холодильних компаній показує, що традиційні установки з ГФУ-холодоагентами поступаються за своєю енергоефективності систем на діоксиді вуглецю, як в комерційному, так і промисловому холодопостачанні. Низька в'язкість, високі щільність, тепловіддача та об'ємна продуктивність, відносно менші втрати тиску і температурні напори в комунікаціях і апаратах дозволяють підвищити енергоефективність систем на CO<sub>2</sub>, а також знизити їх масогабаритні характеристики.

Безпека процесів і використовуваних технологій також грає одну з ключових ролей в світі штучного холоду. У зв'язку з цим переважно використання нетоксичних і негорючих робочих речовин. Вибухобезпека і відносна нетоксичність діоксиду вуглецю особливо привабливі в великих холодильних системах. Використання ж сучасного обладнання і систем управління дозволяє спростити монтаж та експлуатацію таких установок.

На думку багатьох фахівців, CO<sub>2</sub> є найближчою альтернативою традиційним холодоагентів. Діоксид вуглецю невибухонебезпечний і в малих концентраціях нетоксичний, екологічний і більш ефективний. За останній час пройшло кілька етапів еволюції систем на CO<sub>2</sub> і накопичено достатній досвід використання установок з цим холодоагентом.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Основні характеристики

За своїм термодинамічних властивостях CO<sub>2</sub> не дуже підходить для використання в якості холодоагенту. Разом з тим, CO<sub>2</sub> має низку унікальних теплофізичних властивостей, таких як високий коефіцієнт теплопередачі, відносно низька чутливість до втрат тиску, дуже низька в'язкість.

На практиці системи на CO<sub>2</sub> забезпечують дуже високу продуктивність, в основному завдяки більш високим показникам теплообміну, дуже низькій витраті енергії на насосну циркуляцію при використанні CO<sub>2</sub> в якості вторинного холодоагент і можливості використання режиму дуже низького тиску конденсації в зимовий час в холодних кліматичних умовах.

Для систем на CO<sub>2</sub> характерна більш висока залежність їх ефективності від області застосування і кліматичних умов в порівнянні з системами на інших холодоагентах. Зниження ефективності системи зі збільшенням температури конденсації є характерною ознакою всіх холодоагентів, а CO<sub>2</sub> належить до холодоагентів, для яких це зниження найбільш помітно. Хороші теплофізичні властивості CO<sub>2</sub> в певній мірі компенсують цей недолік, але всьому є межа.

CO<sub>2</sub> характеризується високою енергоємністю при підвищених температурах, і при можливості утилізації тепла, що виділяється для нагріву води в системі господарсько-побутового водопостачання або інших аналогічних цілей загальна ефективність системи стає дуже високою.

Нижче приведена фазову діаграму для CO<sub>2</sub>. 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> може існувати тільки в твердій або паровій фазі. При такому тиску рідина утворюватися не може. Нижче -78.4 ° C [-109.1 ° F]

CO<sub>2</sub> знаходиться в твердій фазі. Утворюється «сухий лід». Коли температура перевищує значення, вказане вище, CO<sub>2</sub> сублимується в парову фазу. При тиску 5.2 бар [75.1 фунт / дюйм<sup>2</sup>] і температурі -56.6 ° C [-69.9 ° F] CO<sub>2</sub> досягає, так званої, потрійної точки. У цій точці всі три фази існують в рівноважному стані.

При температурі 31.1 ° C [88.0 ° F] CO<sub>2</sub> досягає своєї критичної точки. У цій точці щільності CO<sub>2</sub> в рідинній і паровій фазі однакові. Отже, відмінність між двома фазами зникає і CO<sub>2</sub> існує в понадкритичній фазі. CO<sub>2</sub> може використовуватися в якості холодоагент в холодильних системах різних типів, як субкритичних, так і транскритичних.

При використанні CO<sub>2</sub> в якості холодоагент необхідно враховувати як потрійну, так і критичну точку для будь-яких типів холодильних систем.

У класичному субкритичного холодильного циклі, який ми всі добре знаємо, весь діапазон робочих температур і тисків знаходиться нижче критичної точки і вище потрійної точки. Одноступінчасті холодильні системи на CO<sub>2</sub> так само прості, але мають деякі несприятливі чинники, пов'язані з обмеженнями значень температур і високого тиску.

Транскритичні холодильні системи на CO<sub>2</sub> в даний час використовуються тільки в маленьких і комерційних холодильних установках. Мова йде про мобільні системи кондиціонування повітря, невеликих теплових насосах і системах охолодження супермаркетів. Транскритичні системи не застосовуються в промислових холодильних установках.

Робочий тиск в субкритичного циклі знаходиться зазвичай в діапазоні: від 5.7 до 35 бар [від 83 до 507 фунт / дюйм<sup>2</sup>] при відповідній температурі: від -55 до 0 ° C [від -67 до 32 ° F]. Найбільш широко CO<sub>2</sub> застосовується в каскадних системах, розроблених для промислових холодильних установок. Це обумовлено тим, що діапазон робочих тисків для даного випадку 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.

## 1.2 Екологічність і безпека

В останні роки значення CO<sub>2</sub> як холодоагент значно зростає для цілого ряду застосувань. Багато в чому завдяки тому, що з точки зору охорони навколишнього середовища і безпеки використання, CO<sub>2</sub> є одним з небагатьох холодоагентів, придатних для систем охолодження супермаркетів. Однак CO<sub>2</sub> не може служити заміною всіх існуючих холодоагентів. Доцільність його використання необхідно оцінювати в кожному конкретному випадку, враховуючи сумарний еквівалентний тепловий вплив і експлуатаційні витрати.

У різних системах охолодження знаходять все більш широке застосування так звані природні холодоагенти: вуглеводні, діоксид вуглецю і аміак [3]. Це викликано обмеженням і подальшою заборонаю використання озоноруйнуючих речовин відповідно до Монреальським протоколом (1987 р), а також внесенням в нього в 1990-і роки ряду поправок і коректив, в які були включені додаткові, в тому числі викликають парниковий ефект, холодоагенти.

На цьому тлі підвищений інтерес до діоксиду вуглецю стає цілком зрозумілим. Діоксид вуглецю має такі переваги: має високу об'ємну холодопродуктивність, не токсичний і безпечний, інертний до матеріалів, дешевий і доступний. У таблиці представлені деякі властивості діоксиду вуглецю в порівнянні з іншими холодоагентами.

Основні недоліки діоксиду вуглецю, як випливає з таблиці, - низька критична температура і високий тиск в області робочих температур. Однак високий тиск визначає і переваги CO<sub>2</sub> в порівнянні з іншими холодоагентами:

1. Охолодження компресора при заданій його об'ємній продуктивності при роботі на діоксиді вуглецю вище внаслідок високої щільності газу.



2. Падіння тиску у випарниках слабо впливає на зміни температури кипіння, так як крива фазового переходу у CO<sub>2</sub> виявляється більш крутий в порівнянні з іншими холодоагентами. Це дозволяє збільшити масову витрату холодоагенту через випарник і тим самим підвищити ефективність тепловіддачі.

Цикли холодильних машин, що працюють на діоксиді вуглецю, можуть здійснюватися як в надкритичних, так і в докритичних областях [4].

У промислових каскадних холодильних машинах в нижній гілці використовують найчастіше докритичний цикл, який реалізується на CO<sub>2</sub>. Як правило, в них в якості холодоагенту верхньої гілки застосовується аміак або гідрофторвуглець (R410A, R407C, R507) [5].

Каскадні холодильні машини з аміаком в якості холодоагенту верхньої гілки створювалися для виробництва низькотемпературного рідкого діоксиду вуглецю [6].

Для вироблення холоду зазначені каскадні холодильні машини застосовуються вже більше 10ти років. У них досягається не тільки підвищення промислової безпеки за рахунок зниження кількості аміаку, але і зниження енергоспоживання на 10-15% в порівнянні з традиційними двоступінчастими схемами.

Діоксид вуглецю використовують в нижній гілці каскаду в діапазоні температур від -55 до 0 ° C, що відповідає тискам від 5,7 до 35 бар. При цьому нижня гілка холодильної машини може працювати в різних режимах: безпосереднє кипіння діоксиду вуглецю в випарнику; примусова циркуляція CO<sub>2</sub> (з насосною подачею холодоагенту); охолодження споживачів з використанням CO<sub>2</sub> в якості проміжного холодоносія.

У світі вважають CO<sub>2</sub> одним з найбільш підходящих холодоагентів, як для промислових систем охолодження, так і для холодопостачання супермаркетів. Цей факт також підтверджується змінами, що відбуваються на ринку систем охолодження. Чому CO<sub>2</sub>? Це раціональний і енергоефективний вибір [9]:

- Екологічно безпечний.
- CO<sub>2</sub> не робить вплив на озоновий шар і в порівнянні з традиційними ГФВ-холодоагенті до 4000 разів менше впливає на глобальне потепління.
- Холодоагент, припинення використання якого не планується. Отже, не варто турбуватися про розглянутих законопроектів, про зменшення і припинення використання ДФУ, дорогих способах утилізації або збільшенні вартості холодоагентів і їх оподаткування.
- Це найпростіший спосіб зменшити вуглецевий слід: супермаркети повідомляють про зменшення вуглецевого сліду більш ніж на 30% після переходу на CO<sub>2</sub> в якості холодоагент. При цьому також береться до уваги модернізація інженерних систем будівель, включаючи освітлення.
- Високий потенціал рекуперації тепла в транскритичних системах CO<sub>2</sub>.
- Збільшення ефективності системи за рахунок використання технології відтавання гарячими парами CO<sub>2</sub>.
- CO<sub>2</sub> - недороге і доступне робоча речовина.
- Чудові теплофізичні властивості.
- Завдяки властивостям CO<sub>2</sub> системи виходять компактніше; за інших рівних умов зменшуються типорозміри компресорів, труб, арматури і кількість ізоляції для субкритичних каскадних систем, як і типорозміри насосів, частотних інверторів і заправка робочою речовиною в розсолів застосуваннях.
- Підвищення продуктивності систем завдяки високоефективним процесам теплообміну поряд зі зменшенням вуглецевого сліду.
- Доведена економія. Кінцеві користувачі, як промислові, так і комерційні, повідомляють про результати - застосування CO<sub>2</sub> знижує експлуатаційні витрати.
- субкритичного каскадні системи на CO<sub>2</sub> доводять свою високу ефективність у всіх кліматичних умовах.
- Транскритичні системи є ефективним, простим і економічним рішенням практично у всіх кліматичних зонах.

- Застосування CO<sub>2</sub> в насосних системах дозволяє знизити енергоспоживання насосів до 90% в порівнянні з традиційними розсолами.

Таблиця 1.1 - Властивості діоксиду вуглецю в порівнянні з іншими холодоагентами

Тип холодоагенту	HFC	Вуглеводні		NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
холодоагент	R134a	R290	R600a	R717	R744
загальноприйнята назва	Фреон-134a	Пропан	Ізобутан	Аміак	Діоксид вуглецю
природа холодоагент	штучний	природний	природний	природний	природний
Потенціал руйнування озонового шару (ODP)	0	0	0	0	0
Потенціал глобального потепління (GWP)	3200	3	3	0	1
Критична температура, °C	101,2	97	135	132,4	31,1
Критичний тиск, бар	41	42	36	113	74
горючість	-	+	+	+	-
токсичність	-	-	-	+	-

### 1.3 Критерій вибору холодоагентів

Приймаючи рішення, який холодоагент використовувати [10] в тій чи іншій холодильній установці або кондиціонері, важливу роль відіграють такі критерії як безпеку, витрати і охорона навколишнього середовища. У зв'язку з постійним зростанням цін на енергоносії, все більшу роль відіграє також споживання обладнанням електроенергії. В ідеалі використовуваний холодоагент повинен володіти чудовими термодинамічними характеристиками, високою хімічною стабільністю і хорошими фізичними властивостями. Крім того, він не повинен впливати на навколишнє середовище, або його вплив на

неї має бути мінімальним. Також холодоагент повинен бути доступний повсюдно за низькою ціною.

Але, на жаль, холодоагент, що відповідає всім цим вимогам, немає. Тому на практиці рішення на користь найбільш підходящого холодоагент залежить від різного ряду факторів. При цьому сфера застосування і вимоги, встановлені експлуатаційним підприємством, грають таку ж важливу роль, як і місце установки устаткування, і питання його впливу на навколишнє середовище. Але вирішальним моментом впливу на енергоспоживання є все-таки конструкційну рішення всієї холодильної установки, враховуючи умови часткових навантажень, оскільки її ефективність залежить в більшій мірі від загальної концепції обладнання, ніж від вибору холодоагент. Однак ряд актуальних проектів показує, що холодильне обладнання працює ефективно і без нанесення шкоди навколишньому середовищу в тому випадку, якщо в ньому застосовуються природні холодоагенти.

За останні десять років в світі безперервно зростає інтерес до холодильних установок, що працюють на двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). З одного боку, це сталося через те, що чинний на світовому рівні концерн Nestlé постійно форсував розвиток каскадних холодильних установок, що працюють на аміаку або на двоокису вуглецю, довівши тим самим їх енергоефективність в Європі, США і Японії. Інші компанії наслідували цей приклад. У деяких країнах ця тенденція розвитку була додатково посилена за рахунок державних заохочень. Так, наприклад, Голландія помітно знизила податки на установки, що працюють на  $\text{CO}_2$ , а в Скандинавії підняли податок на застосування синтетичних холодоагентів. Двоокис вуглецю особливо підходить для рекуперації відведеного тепла або для використання в теплових насосах. В Азії таке застосування широко поширене, і можна припустити, що й інші країни посліdkують цьому прикладу.

Яка кількість енергії можна зекономити за рахунок застосування  $\text{CO}_2$  в ролі холодоагент, в більшій мірі залежить від температури навколишнього

середовища. Так, наприклад, система з двоокисом вуглецю по ефективності явно перевершує обладнання з синтетичними холодоагенті, якщо воно працює в області субкритичних температур. Але і в області надкритичних температур обладнання може бути досить успішно оптимізовано в плані ефективності. Одним з підтверджень тому стала компанія Coca Cola, яка використовує для своїх 550-літрових холодильників як CO<sub>2</sub>, так і холодоагент R134a. Результат: обладнання з CO<sub>2</sub> споживає енергії на 20-30 відсотків менше.

Пропан має досить схожими з холодоагентом R-22 термодинамічними характеристиками. Тому в деяких країнах Азії холодоагент R-22, який використовується в центральних системах кондиювання повітря, після необхідного проведення незначних змін в конструкції обладнання, був замінений пропаном, що дало економію енергії від 10 до 30 відсотків було вироблено порівняння експлуатації морозильних камер на пропані і на холодоагенті R-404A. Морозильні камери, які працювали на пропані, в середньому принесли економію енергії близько 9%.

Вуглеводні володіють прекрасними термодинамічними характеристиками, тому холодильні установки та кондиціонери, в яких вони використовуються, є особливо енергозберігаючими. Вони добре поєднуються з ходовими низькотемпературними мастилами, а рівень критичної температури відносно високий. І хоча займистість вуглеводнів вимагає герметично закритих систем і захист від вибуху для електричних компонентів, компоненти обладнання легкодоступні, а сучасний рівень техніки дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію такого обладнання. У зв'язку з високим потенціалом енергозбереження у систем з вуглеводнями, ряд концернів оголосив про свій намір, про перехід на використання вуглеводневих холодоагентів при придбанні нових холодильних установок.

На сьогоднішній день в Європі діє обмеження на кількість заправляються рідин з вуглеводнів до 150 м Проте це значення було встановлено довільно, чому бажано введення обмеження на кількість заправляється рідини з

урахуванням конкретних умов. Рекомендації таких граничних значень, обумовлених місцем розміщення обладнання, могли б бути вироблені і встановлені в рамках науково-дослідного проекту. Ймовірно після проведення такого дослідження могло б піти дозвіл про застосування великої кількості заповнює рідини за умови, що резервуар з пропаном знаходився б на даху будівлі або у великому і добре провітрюваному приміщенні.

У США, очевидно, це питання вже переосмислюється: якщо до сьогоднішнього дня використання вуглеводнів обмежувалося лише промисловим сектором, то це обмеження в майбутньому, можливо, буде скасовано. Агентство захисту навколишнього середовища США (Environmental Protection Agency), що діє особливо жорстко по відношенню до загрозливих безпеки речовин, в зв'язку з законом про відповідальність виробника за шкоду, вперше дозволило провести робочу дослідження, при якому пройдуть випробування 2 000 морозильних камер з горючими холодоагенті. Це могло б стати переломним моментом у вирішенні даного питання.

Природні холодоагенти недорогі, доступні в необмеженій кількості і можуть вже сьогодні задовольнити вимоги майже всіх областей, де застосовується холод. До того ж, в порівнянні з синтетичними холодоагенті, вони мають дуже незначним потенціалом глобального потепління, викликаного парниковим ефектом. Сьогодні близько 15% використовуваної в усьому світі електроенергії припадає на вироблення холоду - в результаті чого, виникає величезний потенціал економії. Тому заходи щодо економії енергії протягом всього терміну служби холодильного обладнання стають все більш важливими і можуть значною мірою внести свою лепту в поліпшення навколишнього середовища. У зв'язку з цим, використання природних холодоагентів дає підприємствам подвійний стимул, так як в результаті зниження енергоспоживання вони не тільки знижують витрати, але і одночасно підтримують дбайливе ставлення до навколишнього середовища. З точки зору екології і економіки все говорить про те, що надалі необхідно робити ставку

саме на природні холодоагенти для довготривалого забезпечення захисту інвестицій та навколишнього середовища.

Таблиця 1.2 - Порівняння цін різних холодоагентів

Робоча речовина	Ціна, грн\кг
Діоксид вуглецю (R744)	5-10
Аміак (R717)	15-20
Пропан (R290)	15-20
Фреон (R404а)	150-200
Фреон (R507А)	150-200

#### 1.4 Тиск в холодильних системах на CO<sub>2</sub>

Говорячи про переваги CO<sub>2</sub> важливо відзначити, що цей холодоагент також має ряд особливостей. Крім вищою області робочих тисків на відміну від традиційних холодоагентів CO<sub>2</sub> має високу потрійну і низьку критичну точки [11]. Потрійну точку CO<sub>2</sub> (мінус 56,6 ° С, 5.2 бар), на практиці пов'язану з випаданням «сухого льоду», слід враховувати при інсталяції і обслуговуванні системи. Облік критичної точки CO<sub>2</sub> (+ 31.1 ° С, 73.6 бар) важливий як при обслуговуванні, так і при проектуванні систем на діоксиді вуглецю.

Залежно від призначення і типу проектні тиску систем CO<sub>2</sub> можуть змінюватися в діапазоні від 40 до 140 бар. При цьому в промисловому холоді використовуються субкритичного системи, а в комерційному популярні як субкритичного, так і транскритичні установки.

Транскритичні системи CO<sub>2</sub> за проектним тиску можна розділити на 4 частини: лінія нагнітання від компресорів до «газкулера» і клапана високого тиску -120 бар (140 бар); ресивер і рідинна лінія - 90 бар або 60 бар (при наявності допоміжної системи охолодження); усмоктувальна магістраль середньотемпературного контуру - 45 бар; усмоктувальна магістраль низькотемпературного контуру - 35 бар. У каскадних субкритичних комерційних установках (наприклад, ДФУ / CO<sub>2</sub>) діапазон проектних тисків становить від 42 до 46 бар. У промисловому холоді каскадні системи (переважно NH<sub>3</sub> / CO<sub>2</sub>) мають діапазон тисків від 40 до 52 бар в залежності від способу відтавання випарників, а робочий тиск лежить в діапазоні від 6 до 35 бар для контуру CO<sub>2</sub>, що відповідає робочому діапазону температур від -55 до 0 ° С. Застосування відтавання випарників гарячими парами, як правило, підвищує максимальний робочий тиск системи до 45 бар.

Проектне тиск систем CO<sub>2</sub> визначається, як правило, виходячи з максимального робочого і стоянкового тисків системи, способи відтавання, пікових тисків і тиску спрацьовування запобіжних клапанів.

### 1.5 Субкритичні каскадні системи CO<sub>2</sub>

Для субкритичних каскадних систем на CO<sub>2</sub> [12] рівень проектного тиску лежить в діапазоні 40-52 бар, робочі тиску знаходяться в діапазоні 10-30 бар (комерційні каскадні системи) і 6-45 бар (промислові каскадні системи з розморожуванням гарячим газом) при діапазоні температур -50 ... + 10 ° С. Відповідно в більшості випадків можна застосовувати звичне нам холодильне обладнання для ГФВ-холодоагентів (при виконанні умов максимального проектного тиску і допустимості використання з CO<sub>2</sub>).

На практиці зустрічаються різні типи субкритичних каскадних установок на CO<sub>2</sub>, серед яких найпоширенішими є системи з насосною циркуляцією і комбіновані системи з безпосереднім охолодженням



У порівнянні з традиційними аміачними системами кількість заправляється аміаку в каскадних установках з NH<sub>3</sub> / CO<sub>2</sub> може бути знижено до 10 разів, що підвищує безпеку таких систем.

Енергоефективність каскадних систем багато в чому залежить від проміжної температури в конденсаторі-випарнику і способу відтавання споживачів. Температура конденсації CO<sub>2</sub> в каскадних установках, як правило, лежить в діапазоні -5 ...- 15 ° C, при якому досягається оптимальне значення холодильного коефіцієнта системи.

## 1.6 Транскритичні системи на CO<sub>2</sub>

### 1.6.1 Проста конструкція транскритичної системи

Транскритичні системи застосовуються в різних за складністю установках. Це можуть бути як прості холодильні агрегати, наприклад, такі які стоять в окремих охолоджуваних вітринах, так і складні холодильні системи супермаркетів з компресорними центральними. Найбільш прості конструкції транскритичних систем використовуються в холодильних агрегатах обладнання, що встановлюється в зоні торгівлі або поза цією зоною. Конструкції таких систем містять кілька електронних компонентів з простими пристроями регулювання високого тиску такими, як дросельні отвори або капілярні трубки, які виступають одночасно в ролі розширювальних пристроїв. В установках з більш високою продуктивністю використовуються автоматичні регулятори зворотного тиску.

У таких 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.

### 1.6.2 Транскритична бустерна система

Транскритична бустерна система є однією з найбільш перспективних систем для застосування в областях з холодним кліматом. Причиною цьому

служать кілька факторів: транскритична бустерна система буває економніша в плані енергоспоживання в порівнянні з системами, що працюють на фреоні R404a, і в той же час вона має спрощеною конструкцією.

Типова транскритична вуглекислотна бустерна система розділяється по тиску на три секції: секція високого тиску, секція середнього тиску і секція низького тиску.

Розрахунковий тиск в середньотемпературній секції зазвичай становить 40-45 бар, а в низькотемпературній секції - 25 бар. При цьому спостерігається тенденція проектувати середньотемпературну і низькотемпературну секції на однаковий тиск.

Слово «бустерна» з'явилося в назві через роботу системи в т.ч. і на «низький» холод, завдяки використанню додаткових (бустерних) низькотемпературних компресорів [13]. У складі такої установки можна виділити 4 рівні проектних тисків:

- лінія нагнітання від компресорів до газоохолоджувача і клапана високого тиску - 120 бар (140 бар);
- ресивер і рідинна лінія - 90 бар (не потрібно охолодження при зупинці) або 60 бар (при наявності допоміжної системи охолодження);
- усмоктувальна магістраль середньотемпературного контуру - 45 бар; усмоктувальна магістраль низькотемпературного контуру - 35 бар (25 бар).

Робочі тиску знаходяться в діапазоні:

- від 45 до 100 бар для лінії нагнітання і до входу в клапан високого тиску;
- від 30 до 40 бар для ресивера і рідинної лінії;
- від 20 до 30 бар для середньотемпературного всмоктування;
- від 10 до 16 бар для низькотемпературного всмоктування.

Відмінною особливістю такої установки є те, що використовується тільки один холодоагент - CO<sub>2</sub>. У теплий період року, при температурі навколишнього середовища (T<sub>ос</sub>) вище + 25 ° C (+ 27 ° C), що нагнітається в

газоохолоджувач CO<sub>2</sub> не може бути сконденсована, тому що при таких умовах холодоагент знаходиться в транскритичному стані - температура і тиск вище критичних значень ( $T_{кр} = + 31.1 \text{ }^\circ \text{C}$ ,  $P_{кр} = 73.6 \text{ бар}$ ). Відповідно в теплообмінному апараті відбувається тільки охолодження транскритичного CO<sub>2</sub> до температури на 3-5 ° вище  $T_{oc}$ . Далі, після розширення в клапані високого тиску (CCMT / ICMTS), транскритичний CO<sub>2</sub> розділяється на два фазових стану: рідина і газ. Утворився «надлишковий» газ в ресивері відправляється по байпасній лінії через клапан ССМ / ССМТ в лінію середньотемпературного всмоктування. В інші пори року нагнітається CO<sub>2</sub> конденсується в газоохолоджувачі і в рідкому вигляді відправляється в ресивер.

Транскритичні бустерні системи CO<sub>2</sub> набули широкого поширення в магазинобудуванні (більше 7500 діючих об'єктів по всьому світу). У порівнянні з традиційними установками на ГФВ холодоагентах, в помірному кліматі застосування транскритичної системи дозволяє знизити річне енергоспоживання на 15-20%. А розвиток таких технологій як ежектор і паралельне стиснення дозволяє транскритичним установкам CO<sub>2</sub> залишатися ефективніше традиційних систем навіть в країнах з жарким кліматом. На даний момент це є основним вектором розвитку транскритичної технології CO<sub>2</sub>. Окремо необхідно відзначити високий потенціал рекуперації тепла, який в більшості випадків повністю забезпечує потребу магазину в опаленні та ГВП.

## ВИСНОВКИ

За останні роки перспективність CO<sub>2</sub> як холодоагенту помітно зросла. Діоксид вуглецю - один з небагатьох холодоагентів для холодильних систем, актуальний з точки зору ефективності застосування і безпеки для навколишнього середовища. Особливості CO<sub>2</sub>:

- Екологічний (ODP = 0, GWP = 1).
- Безпечний (не вибухонебезпечні і не токсичний).
- Енергоефективний.
- Висока компактність систем.
- Низька вартість холодоагенту.

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.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Данфосс. Преимущества CO<sub>2</sub> в холодильной технике [электронный ресурс].<http://refrigerationandairconditioning.danfoss.ru/technicalarticles/rc/preimushchestva-co2-v-kholodil-noy-tekhnikе/#/> - 17.12.18.
- 2 Руководство по применению «Системы охлаждения на CO<sub>2</sub> для продовольственных магазинов розничной торговли» - ООО «Данфосс», 2009. – 54 с.
3. Горбенко Г.А. Применение диоксида углерода в холодильных технологиях / Г.А. Горбенко, И.В. Чайка, П.Г. Гакал, Р.Ю. Турна. – 2009.
- 4 Мартыновский В.С. Холодильные машины (Термодинамические процессы). — М.: Пищепромиздат, 1950. — 263 с.
- 5 Железный В.П., Жидков В.П. Экологоэнергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике. — Донецк: Изд-во «Донбасс», 1996. — 144 с.
- 6 Пименова Т.Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. — М.: Лёгкая пищевая промышленность, 1982. — 208 с.
- 7 ASHRAE Position Document on Natural Refrigerants. January 28, 2009. — 10 с.
- 8 David Hinde, Shitong Zha, Lin La. Carbon dioxide in North American supermarkets// ASHRAE Journal. — Vol. 51. — February, 2009. — P. 18-26.
- 9 Брошюра «Энергосбережение и защита окружающей среды с нашими системами на CO<sub>2</sub>» - Данфосс.
- 10 Моника Витт. Природные хладагенты – актуальное развитие и тенденции, 2009.
- 11 Данфосс. Давления в холодильных системах CO<sub>2</sub>. [электронный ресурс].<http://refrigerationandairconditioning.danfoss.ru/technicalarticles/rc/davleniyе-v-kholodil-nykh-sistemakh-co2/#/>. – 17.12.18.

12 Данфосс. Субкритические каскадные системы CO<sub>2</sub> [электронный ресурс]. <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.ru/technicalarticles/rc/subcritical-co2-systems/#/> - 17.12.18.

13 Данфосс. Транскритические системы на CO<sub>2</sub> [электронный ресурс]. <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.ru/technicalarticles/rc/transcritical-co2-systems/#/> - 17.12.18.