

РОЗДІЛ 1

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 661.97; 621.56/.59

О.В. Дьяченко

ООО «Айсблнк», ул. Пастера, 29, г. Одесса, 65026, Украина

✉ e-mail: diachenko-ov@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5999-3965>**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН. ЭФФЕКТИВНЫЕ ЦИКЛЫ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

В качестве рабочих веществ пароконденсационных холодильных машин (ПХМ) можно использовать различные вещества. Это специально синтезированные соединения – фреоны, и натуральные хладагенты – аммиак, двуокись углерода, углеводороды. В работе проанализированы циклы ПХМ, пригодные для работы на двуокиси углерода (R744). Рассмотрены докритические, транскритические, дроссельные, детандерные и каскадные циклы, в которых двуокись углерода применяется в качестве хладагента низкотемпературного контура. Приведено сравнение характеристик дроссельных циклов с различной температурой охлаждения, одно- и двухступенчатым сжатием. Представлена краткая история внедрения холодильных установок, работающих на CO₂, приведен перечень производителей, выпускающих оборудование с учетом особенностей исследуемого рабочего вещества. Показаны преимущества систем охлаждения, работающих на двуокиси углерода, на основе опыта их эксплуатации в различных странах Европы.

Ключевые слова: Цикл холодильной машины; Натуральные холодильные агенты; Двуокись углерода; Холодильный коэффициент; Степень термодинамического совершенства

О.В. Дьяченко

ТОВ «Айсблнк», вул. Пастера, 29, м. Одеса, 65026, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ В ЯКОСТІ РОБОЧОЇ РЕЧОВИНИ ПАРАКОМПРЕСІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН. ЕФЕКТИВНІ ЦИКЛИ ТА ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ У НАРОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

В якості робочих речовин пароконденсационних холодильних машин (ПХМ) можливо використовувати різноманітні речовини. Це є спеціально синтезовані сполучення – фреони, та натуральні холодоагенти – аміак, двоокис вуглецю, вуглеводні. В роботі проаналізовані цикли ПХМ, які придатні для роботи на двоокисі вуглецю (R744). Розглянуті докритичні, транскретичні, дросельні, детандерні та каскадні холодильні цикли, в яких двоокис вуглецю використовується в якості холодоагенту низькотемпературного контуру. Наведено порівняння характеристик дросельних циклів з різноманітною температурою охолодження, одно- та двоступеневим стисненням. Представлена коротка історія впровадження холодильних установок, які працюють на CO₂, наведений перелік виробників, які випускають обладнання з урахуванням особливостей робочої речовини, що досліджується. Показані переваги систем охолодження, які працюють на двоокисі вуглецю, на основі досвіду їх експлуатації в різноманітних країнах Європи.

Ключові слова: Цикл холодильної машини; Натуральні холодильні агенти; Двоокис вуглецю; Холодильний коефіцієнт; Ступінь термодинамічної досконалості

DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.39283



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВВЕДЕНИЕ

Качество жизни отдельного человека зависит от объемов потребления энергии. По данным статистики на энергоснабжение различных систем охлаждения расходуется около 13 % вырабатываемой в мире электроэнергии [1]. Работы в области

снижения удельного энергопотребления различных холодильных систем отвечают международным требованиям энергетической, экологической и экономической эффективности, а также основным направлениям политики Украины в области энерго- и ресурсосбережения. С каждым годом обостряются экологические проблемы Челове-

ства¹ [1–4]. Накопление углекислого газа в атмосфере – одна из основных причин парникового эффекта. Содержание парниковых газов (СО₂, метана и др.) неуклонно увеличивается. Извлечение двуокиси углерода из отбросных газовых потоков техногенного происхождения с целью дальнейшего использования, например, в качестве рабочего тела холодильных машин, является актуальной задачей и в конечном итоге приводит к уменьшению степени загрязнения окружающей среды.

II. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

СО₂ – дешевый, нетоксичный, негорючий, экологически чистый хладагент, хорошо совместимый с выпускаемыми минеральными маслами, электроизоляционными и конструкционными материалами. Кроме этого для него отсутствуют ограничения в применении латуни и меди, как для NH₃.

Теплофизические свойства диоксида углерода отличаются некоторыми особенностями: он имеет низкую критическую температуру (31 °С), сравнительно высокую температуру тройной точки (–56 °С), высокие давления в тройной точке (более 0,5 МПа) и критическое (7,39 МПа) [2, 4, 5]. При параметрах окружающей среды невозможно существования СО₂ в жидкой фазе. Следствием этого является высокий уровень рабочих давлений в испарителе и конденсаторе.

Достоинством углекислоты по сравнению с другими хладагентами является высокая удельная объёмная холодопроизводительность. Например, для температуры кипения –15 °С и температуры конденсации +30 °С удельная холодопроизводительность для СО₂ более, чем в 4 раза выше, чем для аммиака.

Теплофизические свойства углекислоты делают невозможным использование стандартного холодильного оборудования (компрессоров, теплообменных аппаратов, арматуры и приборов автоматики), пригодного для других хладагентов. Однако высокие давления при сжатии двуокиси углерода имеют и положительный аспект, связанный с низким значением степени сжатия, вследствие чего увеличивается эффективность применяемых компрессоров. При этом рабочий объём компрессора и диаметры труб будут значительно меньше, чем для других хладагентов.

На рисунке 1, а представлен цикл классической одноступенчатой парокомпрессионной холодильной машины, на рисунке 1, б – цикл ПХМ в $\lg(P)$ - i , а на рисунке 1, в – в T - s -диаграммах.

Эффективность выбранного холодильного цикла (либо хладагента), как правило, оценивается с помощью холодильного коэффициента [6–10]:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_k}, \quad (1)$$

где i_1-i_6 – энтальпии в соответствующих точках цикла (см. рис. 2) и степени термодинамического совершенства (эксергетический КПД)

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\dot{e}}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\dot{e}} = \frac{T_0}{T_{\dot{e}} - T_0}$ – холодильный коэффициент идеального цикла (цикла Карно).

III. ТИПЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ ЦИКЛОВ, ЭФФЕКТИВНЫХ ДЛЯ РАБОТЫ НА СО₂

3.1. Докритические и сверхкритические циклы.

В области температур охлаждения –10...–30 °С, как правило, используют два типа циклов: докритический и сверхкритический [2–4]. Для докритического цикла (рис. 1, б, в) давление изменяется от 10 до 30 бар, для закритического (транскритического) цикла (рис. 1, в) диапазон давлений 30...100 бар.

В закритическом режиме (температуры > 31,2 °С) системы на СО₂ являются менее эффективными, чем оборудование с синтетическими хладагентами. Это связано с тем, что процесс охлаждения в конденсаторе происходит при переменной температуре и высоком давлении ($P > 7,4$ МПа). Особенностью закритического цикла является отсутствие ограничений на выбор давления в конце сжатия. При этом существует оптимальное значение давления сжатия, которое определяется графо-аналитическим способом, показанным в [8, 11].

На рисунке 2 приведены результаты исследований докритического и сверхкритического циклов на диоксиде углерода без учета потерь для двух температур охлаждения: –10 и –30 °С. Из диаграммы видно, что докритический цикл на двуокиси углерода обладает более высокими холодильным коэффициентом (в 1,3...1,7 раза выше в зависимости от заданной температуры в испарителе) и коэффициентом термодинамического совершенства (в 1,2 раза выше, чем для закритического). Улучшения характеристик можно добиться путем уменьшения работы сжатия в компрессоре. С этой целью для сверхкритических циклов рационально применять несколько ступеней сжатия [6]. Исследования (рисунок 2), показали, что использование двухступенчатого сжатия позволяет увеличить как холодильный коэффициент, так и степень термодинамического совершенства. Это возможно за счет особенностей свойств рабочего тела: кривизна изобар в области более высоких температур несколько меньше, чем вблизи линии насыщения.

¹ Halozan H. Refrigerants – from CFCs to natural fluids? // Proceeding 4th International Conference on Compressors and Coolants – Compressors 2001. – Smolenice, Slovakia. – 2001.

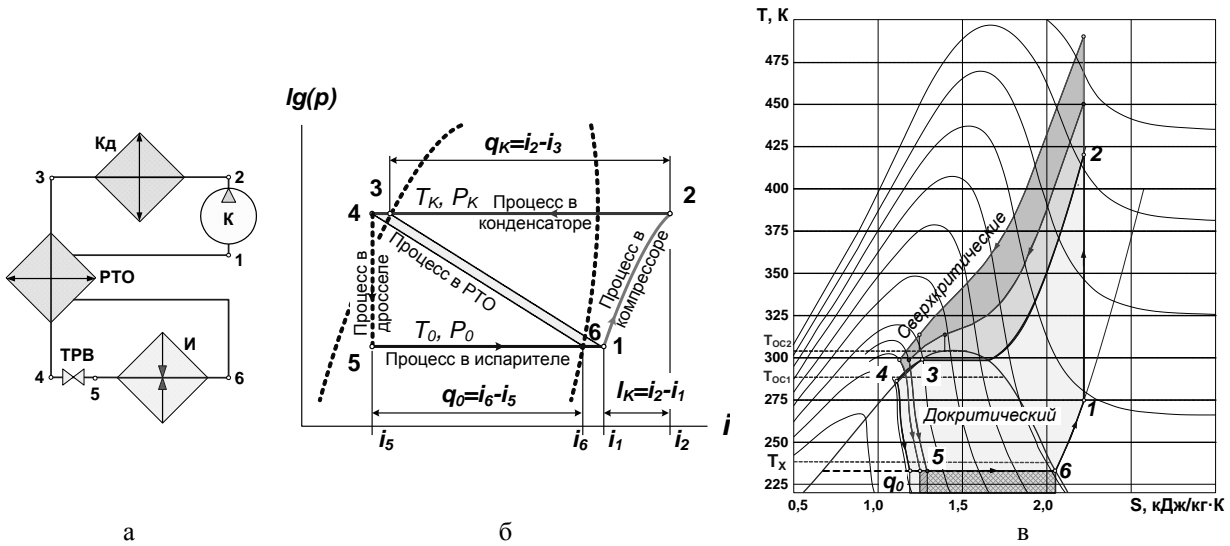


Рисунок 1 – а – схема холодильной машины; б – процессы в ПХМ в $\lg(P)$ - i диаграмме; в – докритический и сверхкритический циклы в T - s -диаграмме для CO_2

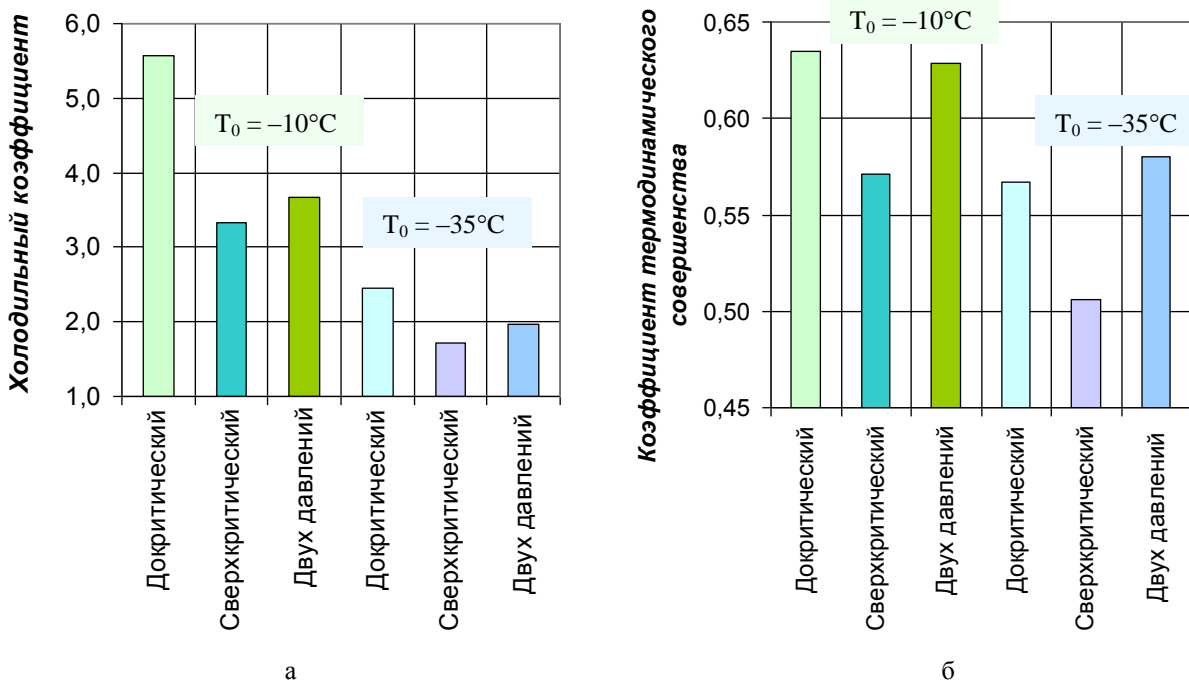


Рисунок 2 – Сравнение холодильных циклов на CO_2 . Температура в конденсаторе для докритического цикла равна 20°C , для сверхкритического – 35°C

3.2. Другие типы циклов. На рисунке 3 показаны схема и цикл несколько экзотического автоматизированного детандерного цикла, запатентованного в 2002 г.². Установка может работать как в докритическом, так и сверхкритическом режимах. Порядок работы: в случае, когда температура

окружающей среды выше критической, пары хладагента сжимаются в компрессоре К, охлаждаются в двух конденсаторах Кд1 и Кд2 и поступают в детандер. Газ расширяется с получением работы. Микропроцессор включает муфту М1 и работа расширения передается насосу Н.

² Патент РФ 2249773 Компрессионная холодильная машина. Авторы: Шляховецкий В.М., Шляховецкий Д.В. Оpubл. 10.04.2005. Б.и. № 10.

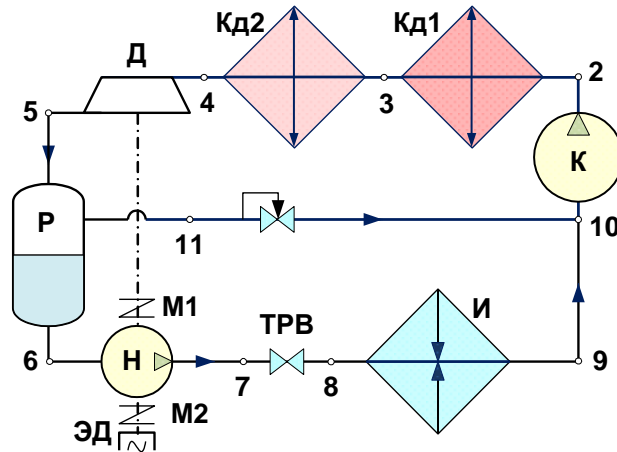


Рисунок 3 – Схема ПХМ с детандером: К – компрессор; Кд1, Кд2 – конденсаторы; РТО – регенеративный теплообменник; ТРВ – терморегулируемый вентиль; Д – детандер; И – испаритель; ЭД – электродвигатель; М1, М2 – муфты

Парожидкостная смесь поступает в ресивер. Жидкость насосом подается в испаритель, полученный пар – в автоматический дросселирующий вентиль «до себя» и, далее, в компрессор. Микропроцессор регулирует производительность компрессора К по массовому расходу отводимого пара.

В докритическом режиме работа расширения в детандере практически соответствует величине внутренних потерь и не может обеспечить работу насоса. В этом случае микропроцессор отключает муфту М1 и включает электродвигатель через муфту М2.

Автоматизированная парокompрессионная холодильная машина с детандером обладает следующими преимуществами:

- холодильный коэффициент и степень термодинамического совершенства детандерного цикла значительно выше, чем дроссельного;
- цикл может функционировать как в закритическом, так и в докритическом режимах и обеспечивает максимально возможную эффективность с учетом внешних температурных условий;
- эффективность работы ПХМ достаточно высока вследствие подачи в испаритель только жидкой фазы;
- за счет использования автоматического регулирования поддерживается жесткая взаимосвязь детандера и компрессора, детандера и жидкостного насоса.

Новым направлением совершенствования холодильной техники, которое интенсивно развивается в последние 15 лет, является замена широко распространенных в промышленности холодильных циклов [11, 12] на аммиаке каскадными низкотемпературными установками³ (рис. 4). При этом высокотемпературный контур работает на R717, а низкотемпературный – на R744. Диоксид

углерода используется в диапазоне температур от –55 до 0 °С, что соответствует давлениям от 0,57 до 3,5 МПа. Указанный диапазон рабочих давлений CO₂ позволяет в нижнем контуре применять оборудование (компрессоры, регуляторы и клапаны), пригодное и для других холодильных агентов. Несмотря на увеличение капитальных затрат, таким образом достигается не только повышение промышленной безопасности за счет уменьшения объема аммиака, но и снижение на 10...15 % суммарного энергопотребления холодильной установки [2].

Нижний контур холодильной машины может работать в различных режимах, подробно описанных в литературе [4]. Это: непосредственное кипение диоксида углерода в испарителе (рис. 4, а); принудительная циркуляция CO₂ с насосной подачей (рис. 4, б); охлаждение потребителей с использованием CO₂ в качестве промежуточного хладоносителя.

IV. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА CO₂

4.1. История применения CO₂ насчитывает около 150 лет. Холодильная машина на двуокиси углерода впервые была запатентована в Великобритании в 1856 году³.

В начале прошлого века наблюдалось бурное развитие холодильной техники. Первый бытовой электрический холодильник был создан в 1913 году. Однако широкое распространение получила модель домашнего холодильника марки Monitor-Top, произведенная фирмой General Electric в 1927 году. В качестве рабочих тел, наряду с двуокисью углерода, применялись достаточно токсичные вещества: сернистый ангидрид и аммиак.

³ Антонссон М. Экологически чистые системы охлаждения // Информационный бюллетень по холодильным системам. – 2010. – № 1. – С. 2-3.

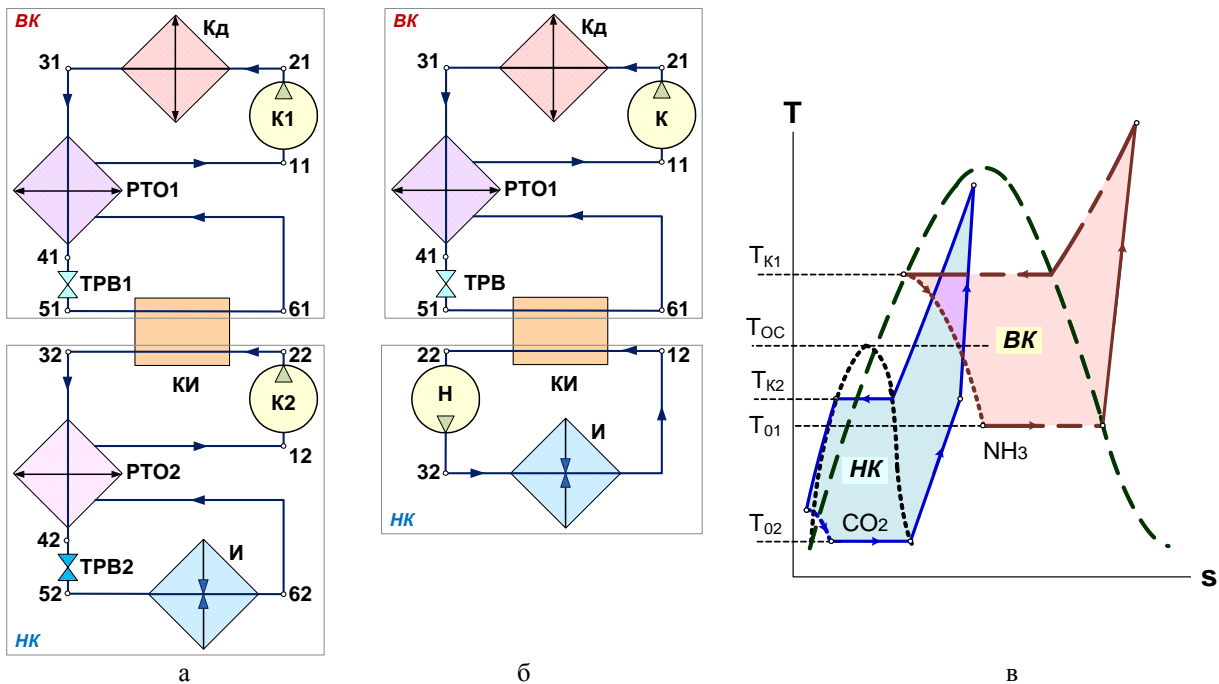


Рисунок 4 – Варианты схем (а, б) и T - s -диаграмма (в) каскадного цикла [12]: CO_2 используется в нижнем контуре. Обозначения: $K, K1, K2$ – компрессоры; K_d – конденсатор; $PTO1, PTO2$ – регенеративные теплообменники; $TPB1, TPB2$ – терморегулируемый вентиль; H – насос; I – испаритель; BK – верхний; HK – нижний контуры

После выпуска в 1930 г. компанией «Кинетик Кеникалз Инк» (США) первых партий дихлордиформетана и организации его промышленного производства в 1932 г. все традиционные для того времени хладагенты, кроме аммиака, практически исчезли с рынка.

В период 1960-90 гг. двуокись углерода вообще не применялась. Только в начале 1990-ых в связи с требованиями международного сообщества по замене ХФУ и ГХФУ производители холодильной техники снова обратили свое внимание на натуральные рабочие тела: двуокись углерода, углеводороды и воду.

Инициатива вернуться к использованию CO_2 в холодильной технике принадлежит скандинавским странам [2], где достаточно низкая температура окружающей среды и законы строго ограничивают применение хлор- и фторсодержащих веществ. Если учесть годовые колебания температуры окружающей среды, использование холодильных систем на двуокиси углерода в этом регионе может быть достаточно эффективным. Кроме этого техническое обслуживание установок на CO_2 значительно проще и не требует суровых мер по соблюдению техники безопасности как, например, для аммиака.

В настоящее время вследствие своей безопасности для окружающей среды и человека холодильные установки, работающие на двуокиси углерода, стали популярны и в других странах в Европе, расположенных значительно южнее [2, 4, 10].

4.2. Специализированные компрессоры. Поскольку циклы на двуокиси углерода работают при

повышенных давлениях, использование «стандартных» компрессоров, применяемых для других рабочих веществ, нецелесообразно. Компрессоры для двуокиси углерода серийно производятся фирмами Sabroe, Bitzer, Dorin, Bock, Danfoss и др. (рис. 5) [2, 4, 13–17]. При их проектировании учитывается высокий уровень рабочих давлений в случае включения их в состав транскритического цикла; система смазки подшипников скольжения выполняется с учетом больших перепадов давления; диаметры всасывающих и жидкостных трубопроводов уменьшены в 2...4 раза по сравнению с системами, работающими на других хладагентах.

В холодильных системах на CO_2 используются поршневые и винтовые компрессоры открытого типа. Однако высокий уровень рабочих давлений налагает особые требования и приводит к удорожанию конструкции компрессора. В связи с этим в последнее время возрос интерес к полугерметичным компрессорным агрегатам. Они проектируются с пятикратным запасом прочности по внутреннему давлению.

В настоящее время осваивается производство винтовых компрессоров, способных работать при высоких давлениях. Например, компрессор производства фирмы GEA Grasso серии AC может обеспечивать давление сжатия 130 бар⁴.

⁴ Новости компаний: Создан для CO_2 – новый компрессор GEA Bock HG34CO2T от GEA Refrigeration Technologies // Холодильный бизнес. – 2012. – № 6. – С. 6. [Электронный ресурс]. Код доступа: www.bock.de.

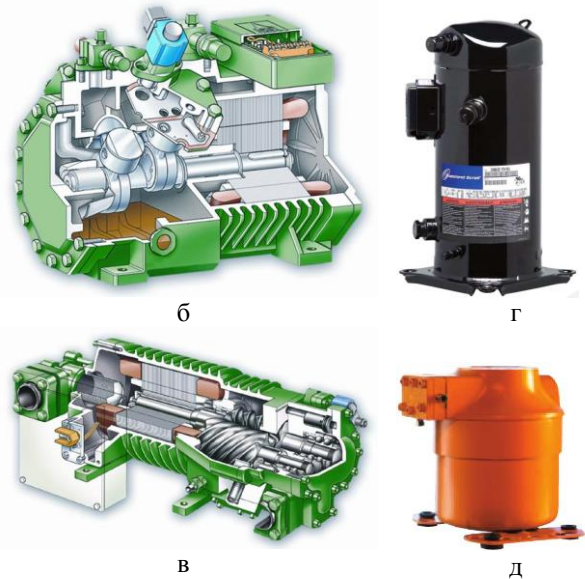
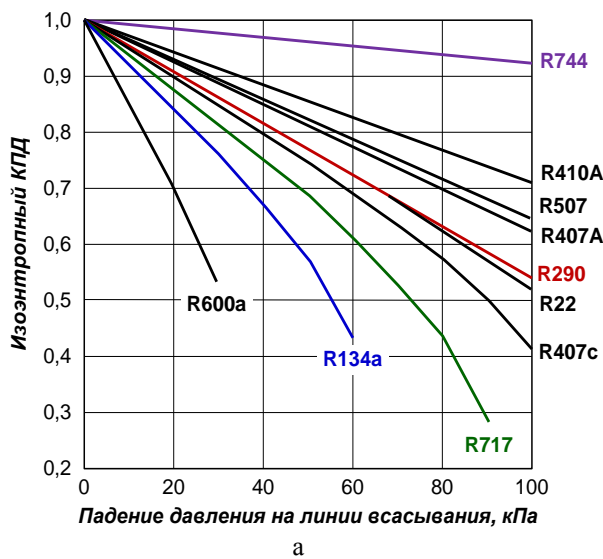


Рисунок 5 – а – вплив ступеня розряження на всасуванні на ізентропний КПД холодильного компресора [15]; компресори для двоокиси вуглецю фірм Bitzer (б, в); Emerson Climate Technologies (г) и Danfoss (д)

4.3. Тенденції розвитку холодильної техніки на CO₂. Кількість холодильних установок на двоокиси вуглецю постійно збільшуються [2]. В 2007 г. тільки 3 супермаркета Європи в якості хладагента використовували CO₂, в 2010 г. їх стало уже 500. Опит компанії Coca Cola, використовуючої для своїх холодильних систем як двоокись вуглецю, так і хладагент R-134a, показав, що обладнання з CO₂ споживає енергії на 20...30 % менше.

Як вказано в джерелі [2], керівництво компанії Danfoss вважає, що CO₂ – найбільш підходящий хладагент для використання в торговельних і інших промислових і напівпромислових системах. По їх розрахунку, якщо б всі супермаркети в світі перейшли на двоокись вуглецю для заморожування м'яса і риби, то навантаження на навколишнє середовище значно знизилася б. В частині, використання CO₂ в якості робочого тіла в системах охолодження супермаркетів спроможне на 30 % зменшити забруднення навколишнього повітря. Крім цього, застосування CO₂ в вторинних системах значно економить енергоспоживання насосних агрегатів (до 90 %).

Найбільш широко використовується діоксид вуглецю в системах кондиціонування повітря автомобілів і поїздів, працюючих за каскадною схемою [6]. Перша каскадна система була введена в Росії в 2006 г. для швидкої заморозки хлібобулочних виробів на базі імпортованого компресорного обладнання і холодильної арматури фірми «York» (США) [11]. В Україні подібна система вперше почала працювати в 2006 г. для охолодження логістичного складу площею близько 100 тис. м². Назначення складу – зберігання замороженої риби [4]. Холодильна система

була створена фірмою «ЕС-Інжиніринг» (Фінляндія), її холодопродуктивність становила близько 1050 кВт. При цьому основним хладагентом є фреон R507, а розподіл холоду здійснюється з допомогою CO₂. Маса заправки двоокисом вуглецю становить 8 т.

Приведені приклади показали, що двоокись вуглецю є перспективним робочим тілом для заміни екологічно шкідливих речовин, які негативно впливають на клімат, не тільки в області холодильної техніки, але і в теплових насосах.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Використання двоокиси вуглецю в якості робочого агента холодильних циклів має деякі особливості. Це:

- високі тиски в випарнику і конденсаторі не дозволяють використовувати стандартне холодильне обладнання, призначене для інших хладагентів;

- ввиду низьких критичних параметрів ефективність простого холодильного циклу залежить від температури навколишнього середовища. В залежності від $T_{0,c}$ застосовують два типи циклів – докритичний і сверхкритичний;

- покращення характеристик сверхкритичного циклу можна досягти шляхом використання двохступеневого стиснення в компресорі з послідовним охолодженням газу після кожної ступені;

- використання CO₂ в нижньому контурі каскадної холодильної установки, де в верхньому контурі робочим речовиною є аміак, дозволяє знизити енергоспоживання холодильної системи на 10...15 % відносно циклу на NH₃;

Анализ циклов с использованием двуокиси углерода показал, что для каждого конкретного случая проектирования системы парокомпрессионной холодильной машины нужно тщательно исследовать исходные данные. Путем подбора соответствующего цикла и оптимизации параметров работы схемы охлаждения можно добиться сокращения удельного энергопотребления установки на двуокиси углерода на 20...30% относительно систем, использующих переходные хладагенты.

Широкое применение двуокиси углерода в качестве рабочего тела холодильных машин значительно снизит загрязнение окружающей среды, особенно с учетом полного жизненного цикла для оборудования на CO₂.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ховалыг Д.М., Сеницын К.М., Бараненко А.В., Цой А.П.** Энергоэффективность и экологическая безопасность техники низких температур // Научный журнал НИО ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2014. – № 1. [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://www.inbt.itmo.ru/articles/1058.pdf>.
2. Системы охлаждения на CO₂ для продовольственных магазинов розничной торговли. Проектирование транскритических и субкритических систем на CO₂ и подбор необходимого оборудования, производимого компанией «Данфосс» // ООО «Данфосс». – 2009. [Электронный ресурс]. Код доступа: www.danfoss.com/CO2.
3. **Цветков О.Б.** Хладагенты, хладоносители и холодильные масла – ностальгия о будущем. [Электронный ресурс]. Код доступа: http://holodko.ru/freon/Tsvetkov_Themophys.pdf.
4. **Горбенко Г.А., Чайка И.В., Гакал П.Г., Турна Р.Ю.** Применение диоксида углерода в холодильных технологиях // Технические газы. – 2009. – № 4. – С. 18-22.
5. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP. Version 9.1): [U.S. Department of Commerce] // National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, Maryland. – 2013.
6. **Мартыновский В.С.** Холодильные машины. – М.: Пищепромиздат, 1950. – 256 с.
7. **Мартыновский В.С., Мельцер Л.З.** Судовые холодильные установки. – М.: Транспорт, 1964. – 383 с.
8. **Dossat R.J., Moran T.J.** Principles of Refrigeration. – Upper Saddle River, 2001. – 454 p. ISBN 13: 9780130272706.
9. **Вайнштейн В.Д., Кантарович В.И.** Низкотемпературные холодильные установки. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 351 с.
10. **Дьяченко О.В.** Использование натуральных хладагентов в системах теплохладоснабжения технологических процессов // СОК. – 2006. – № 10. – С. 98-101.
11. **Харлампи Д.Х., Шерстюк А.В., Братуга Э.Г.** Термодинамический анализ сверхкритических циклов холодильных машин и тепловых насосов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 8 (90). – С. 43-48.
12. [Электронный ресурс]. Код доступа: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Projects/Production_of_the_wheat_starch_and_alcohol/reports.pdf.
13. [Электронный ресурс]. Код доступа: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Projects/Production_of_the_wheat_starch_and_alcohol/reports.pdf.
14. [Электронный ресурс]. Код доступа: www.danfoss.com/NR/rdonlyres/4A74D6CA-C8BA-4F44-BC09-E8CDEC334CFF/1669/kom_CO3.pdf.
15. [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://uash.com.ua/files/bitzer20years.pdf>.
16. [Электронный ресурс]. Код доступа: www.bitzer.de.
17. **Камзолов С.Н., Bonfanti М.** Применение компрессоров Dorin в CO₂-технологиях // Холодильная техника. – 2014. – № 2. – С. 28-31.

Отримана в редакції 21.04.2015, прийнята до друку 03.07.2015

O.V. Diachenko

Iceblick Ltd., 29 Paster Str., Odessa, Ukraine, 65026

✉ e-mail: diachenko-ov@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5999-3965>

CARBON DIOXIDE UTILIZATION FEATURES AS VAPOR-COMPRESSION REFRIGERATING MACHINE WORKING SUBSTANCE. EFFECTIVE CYCLES AND EXPERIENCE OF INTRODUCTION IN THE NATIONAL ECONOMY

As working substances of the vapor-compression refrigerators (VCR) it is possible to use various substances. These are specially synthesized mixtures – freons, and natural coolants – ammonia, carbon dioxide, hydrocarbons. VCR cycles suitable for operation on carbon dioxide (R744) are analyzed in the paper. Subcritical, transcritical, throttle, detander and cascade cycles in which carbon dioxide is applied as a coolant of the low temperature contour are considered. Comparison of throttle cycles with various cooling temperature characteristics, one - and two-level compression is given. The short history of the refrigeration units working at CO₂ introduction is presented, the list of the producers manufacturing the equipment taking into account features of the studied working substance is provided. Advantages of the cooling systems working at carbon dioxide on the basis of their operation experience in various European countries are shown.

Keywords: Refrigerator cycle; Natural refrigerants; Carbon dioxide; Refrigerating coefficient; Degree of thermodynamic perfection

REFERENCES

1. **Khovalyg D.M., Sinitsina K.M., Baranenko A.V., Tsoi A.P.** 2014. Energy efficiency and technological safety technician of low temperatures. *Scientific NIO ITMO*. Seria "Energy efficiency and ecological safety technicians of low temperatures", No. 1. [Electron source]. Access mode: <http://www.inbt.itmo.ru/articles/1058.pdf>. (in Russian).
2. CO₂ refrigeration systems for food shops of retail trade. Transcritical and subcritical systems on CO₂ engineering and selection of the necessary equipment produced of the company "Danfoss". 2009. [Electron source]. Access mode: www.danfoss.com/CO2.
3. **Tsvetkov O.B.** Refrigerants, coolants and refrigerating oil – nostalgia for future. [Electron source]. Access mode: http://holodko.ru/freon/Tsvetkov_Themophys.pdf. (in Russian).
4. **Gorbenko G.A., Chaika I.V., Gakal P.G., Turna R.Yu.** 2009. Application of carbon dioxide in refrigerating technologies. *Tekhnicheskie Gasy. [Industrial Gases]*, No. 4, 18-22. (in Russian).
5. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP. Version 9.1): [U.S. Department of Commerce]. 2013. National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, Maryland.
6. **Martynovsky V.S.** 1950. Refrigeration units. Moscow: Pishpromiazdat, 256 p. (in Russian).
7. **Martynovsky V.S., Melzer L.Z.** 1964. Ship refrigeration units. Moscow: Transport, 383 p. (in Russian).
8. **Dossat R.J., Moran T.J.** 2001. Principles of Refrigeration. Upper Saddle River. 454 p. ISBN 13: 9780130272706.
9. **Vayshtein V.D., Kantarovich V.I.** 1972. Low temperature refrigeration units. *Moscow: Pishhevaya promishlennost'*, 351 p. (in Russian).
10. **Diachenko O.V.** 2006. Usage of natural coolants in heat and cool supply of technological process systems. *SOK*, No. 10, 98-101. (in Russian).
11. **Kharlampidi D.Kh., Sherstuyk A.B., Bratuta E.G.** 2011. Thermo dynamic analysis of overcritical cycles of refrigerating machines and heat pumps. *Energospabgenie. Energetika. Ergoaudit. [Energy saving. Power engineering. Energy audit]*, No. 8 (90), 43-48. (in Russian).
12. [Electron source]. Access mode: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Projects/Production_of_the_wheat_starch_and_alcohol/reports.pdf. (in Russian).
13. [Electron source]. Access mode: http://www.sergey-osetrov.narod.ru/Projects/Production_of_the_wheat_starch_and_alcohol/reports.pdf. (in Russian).
14. [Electron source]. Access mode: www.danfoss.com/NR/rdonlyres/4A74D6CA-C8BA-4F44-BC09-E8CDEC334CFF/1669/kom_CO3.pdf (in Russian).
15. [Electron source]. Access mode: <http://uash.com.ua/files/bitzer20years.pdf>.
16. [Electron source]. Access mode: www.bitzer.de.
17. **Kozmalov S.N., Bonfanti M.** 2014. Usage of Dorin compressors in CO₂-technologies. *Kholodilnaya Tekhnika*, No. 2, 28-31. (in Russian).

Received 21 April 2015

Approved 03 July 2015

Available in Internet 30.08.2015