

УДК 621.577:621.564

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л.

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА $CO_2$ (R744) В ТЕПЛОВЫХ НАСОСАХ

Исторически традиционные хладагенты – фреоны. Они изначально использовались в тепловых насосах и в большинстве промышленно развитых стран либо уже запрещены (группа CFC), либо для них установлены сроки ограниченного использования (группа HCFC). Фактически введено временное разрешение на использование гидрофторуглеродов (группа HCFC), которое определено сроком до 2020 г., а в ряде стран внутренними нормативами намечается более ранний запрет. В настоящее время на производство, использование и торговлю хлорфторуглеродами действует ограничение, определенное «Монреальским протоколом по озоноразрушающим веществам» (1987 г.). В 1996 г. было прекращено производство фреонов группы CFC, а для хладагентов группы HCFC установили постепенное сокращение: до 2003 г. уменьшить на 35 %, до 2010 – на 65 %, до 2015 – на 90 %. Для развивающихся стран этот срок продлен до 2040 г. [1].

В связи с этим возникла проблема замены запрещенных хладагентов новыми рабочими веществами, которые не должны уступать по своим термодинамическим и эксплуатационным качествам, запрещенным или переходным хладагентам. Они должны быть максимально адаптированы к имеющемуся в мире огромному парку тепловых насосов. В настоящее время большинство заменителей фреонов групп CFC и HCFC, при использовании имеющихся ТН, не обеспечивают эксплуатационных показателей [2–4].

Другая проблема заключается в том, что для производных пропана, бутана или еще более тяжелых углеводородов, критическая температура и, как следствие, скрытая теплота фазового перехода снижаются с увеличением молекулярной массы. Однако главный недостаток всех гидрофторуглеродов состоит в относительно высоком значении потенциала глобального потепления по сравнению с природными хладагентами. Поэтому в настоящее время резко интенсифицировалось исследование по применению природных хладагентов, таких как аммиак, пропан, бутан, изобутан и диоксид углерода [5].

Одним из наиболее перспективных природных хладагентов для применения в холодильных системах и тепловых насосах является диоксид углерода ( $CO_2$ , R744). В настоящее время он нашел распространение в низкотемпературных установках, таких как, холодильные машины больших супермаркетов и складов, низкотемпературные ступени мощных промышленных морозильных установок. Главными достоинствами диоксида углерода является его доступность в больших количествах и дешевизна. Кроме того, он негорюч, неядовит, не разрушает озоновый слой и имеет самый низкий потенциал глобального потепления среди применяемых рабочих веществ.

Термодинамические циклы  $CO_2$  могут быть реализованы как в сверхкритической области, так и в докритической. Поэтому для  $CO_2$  существуют два типа циклов: транскритический и докритический. Для транскритического цикла характерно изменение давления от 30 до 100 бар и выше и возможность работы в сверх- и докритической области. Главным ограничением или даже недостатком применения  $CO_2$  является необходимость создания высокого рабочего давления (например, температура конден-

сации для 40 °С отвечает давлению в 85 бар). Учитывая эту особенность, в реальных промышленных установках применяются каскадные циклы, в которых на верхней ступени в качестве хладагента применяется аммиак, а на нижней –  $CO_2$ . Принципиальная схема такого цикла приведена на рис. 1 [7].



Рисунок 1 – Принципиальная схема каскадной установки с рабочими телами  $CO_2 - NH_3$

В каскадном цикле давление  $CO_2$  несколько ниже, чем в надкритическом цикле. Однако данная схема имеет и свои недостатки, которым относят [7]: рост давления в системе во время простоя холодильной установки и давление оттаивания в системе  $CO_2$ .

Для того, чтобы избежать роста давления во время простоя применяется несколько способов [7]:

- для поддержания давления в установке на принятом уровне используют дополнительную небольшую холодильную машину;
- устанавливают расширительный бак, обеспечивающий компенсацию увеличения давления в системе;
- проектируют систему таким образом, чтобы она могла выдержать давление при остановке, примерно равное 80 бар (давление насыщенного пара при комнатной температуре).

В установках, использующих диоксид углерода, применяется несколько способов оттаивания: естественное, водой, электрическое и горячим паром  $CO_2$ . Наиболее эффективным и быстрым является оттаивание горячим паром  $CO_2$ . Однако этот способ требует соблюдения специальных условий по давлению.

Главной проблемой таких установок является нежелательность попадания воды. При взаимодействии  $CO_2$  с водой образуется углекислота, которая может разъедать трубы и арматуру.

Вместе с тем можно перечислить ряд существенных достоинств холодильных установок, использующих  $CO_2$ , которые целиком и полностью компенсируют указанные недостатки, например, такие как:

- существенное сокращение материалоемкости компонентов установок (уменьшение размеров труб, арматуры и элементов автоматики) по сравнению с традиционным исполнением;
- за счет относительно высокого давления  $CO_2$  в системе, производительность и КПД компрессоров на диоксиде углерода существенно выше, чем на аммиаке;
- совместимость  $CO_2$  с различными металлическими материалами намного лучше, чем у других хладагентов, что позволяет применять материалы из латуни и меди;
- $CO_2$  безопасный хладагент, поэтому техническое обслуживание установок значительно проще и не требует суровых мер по технике безопасности;

➤ вода из системы может быть достаточно просто удалена при помощи фильтров-осушителей.

В ТН необходимо нагреть теплоноситель как минимум до 40 °С, а в большинстве случаев и выше до 90–100 °С. Разность температур на входе-выходе составляет 15–60 °С. Увеличение температуры теплоносителя парокомпрессионных ТН связано с повышением температуры и давления конденсации, т.е. с повышением разности и отношений давлений конденсации и кипения. Это, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента преобразования. В установках на R744 значительное изменение температуры при охлаждении газообразного диоксида углерода в надкритической области дает возможность нагреть теплоноситель на большую разность температур. Фактически конкурентная энергетическая эффективность ТН на R744 может быть достигнута только при достаточно большой разности температур теплоносителя. Это позволяет создавать ТН на  $CO_2$  большей тепловой мощности, чем фреоновые, вплоть до 50 МВт, по сравнению с 20 МВт для фреоновых ТН [6].

В настоящее время ТН, работающие на  $CO_2$ , классифицируют по мощности:

- малой мощности, с дроссельной схемой и поршневым компрессором с естественным охлаждением;
- большой мощности, с детандерной или дроссельной схемой и центробежным компрессором.

Обобщенная принципиальная схема теплового насоса на R744 представлена на рис. 2.

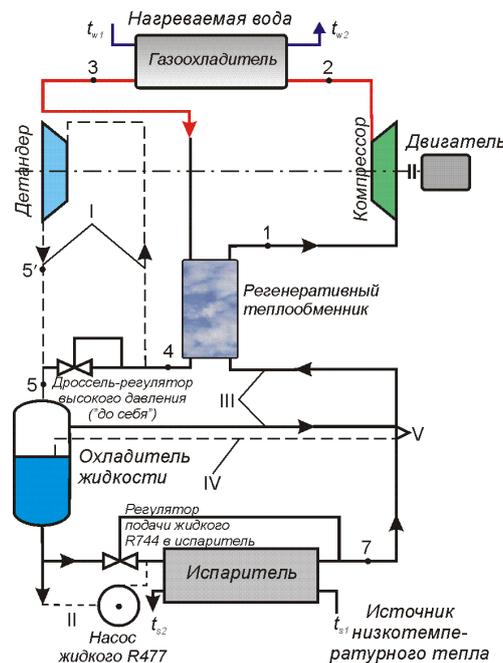


Рисунок 2 – Принципиальная схема теплового насоса на  $CO_2$  (R744) [6]:

- I – включение в систему детандера (в этом случае участок линии с дросселем-регулятором высокого давления закрыт);
- II – включение в схему циркуляционного насоса (в этом случае участок линии с регулятором подачи жидкого R744 в испаритель);
- III – линия газообразного R744 низкого давления;
- IV – парожидкостной смеси при включенной линии II (в этом случае участок линии V закрыт)

В качестве источника низкопотенциальной теплоты используются грунтовые воды и вода водоемов с температурой 8–12 °С, обратная вода систем охлаждения с температурой 18–25 °С, а также высокотемпературные тепловые сбросы с температурой >25 °С. Соответственно температура кипения  $CO_2$  в цикле на практике всегда лежит в диапазоне источника низкопотенциальной теплоты, т.е. в пределах 0–20 °С. Наиболее характерными параметрами являются температура кипения – 5 °С и температура теплоносителя – 80 °С.

Диоксид углерода относится к рабочим веществам высокого давления, и эффективность его использования определяется минимальной разностью температуры входа и выхода теплоносителя. В настоящее время R744 рассматривается как наиболее перспективный хладагент, как хладагент в низкотемпературных ступенях каскадных холодильных систем, тепловых насосов большой мощности или в качестве промежуточного хладагента в системах кондиционирования воздуха.

### Литература

1. Переход на озонобезопасные хладагенты в условиях России / Калнинь И.М., Катерухин В.В., Савицкий И.К., Смыслов В.И., Шаталов В.В. // Холодильная техника.– 1997.– №1.– С. 17–20.
2. Бубялис Э., Шкема Р. Перспектива ретрофита R22 и энергетические характеристики теплового насоса на базе компрессора КХГ-14.-1 // Пром. теплотехника, 2001.– Т.23, №1–2.– С. 79–83.
3. Колосков Ю.Д. Работа компрессионного теплового насоса на R142b // Холодильная техника, 1990.– №7.– С. 26–29.
4. Вассерман О.А., Фомінський Д.В. Термодинамічні властивості альтернативних хладагентів R32 і R125.– Одеса: Вид-во Одес. нац. морс. ун-та, 2002.– 256 с. (укр.)
5. Форбс Пирсон. Хладагенты – прошлое, настоящее и будущее // Холодильная техника, 2004.– №2.– С. 2–6.
6. Калнинь И.М., Васютин В.А., Пустовалов С.Б. Условия эффективного применения диоксида углерода в качестве рабочего вещества тепловых насосов // Холодильная техника, 2003.– №7.– С. 8–12.
7.  $CO_2$  як холодагент для промислового холоду // По матеріалам фірми «Danfoss».– Холод, 2006.– №2.– С. 26–27.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта SHERNPA, контракт № COLL-СТ-2004-500229.

УДК 621.577:621.564

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Хавін Г.Л.

### ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ $CO_2$ (R744) В ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ

Розглянуто питання застосування у теплових насосах природного хладагенту – діоксиду вуглецю. Наведено діаграму «тиск-ентальпія»  $CO_2$  та принципова схема теплового насосу на  $CO_2$  (R744). Обмірковуються особливості, недоліки та переваги використання  $CO_2$  у теплонасосних установках. Надано принципову схему каскадної установки з робочими тілами  $CO_2 - NH_3$ .