

УДК 621.564:621.565

Г.А. Горбенко

ООО «Остров-Украина», а/я 119, г. Вышгород Киевской области, Украина, 07300

e-mail: gorbenkoga@ostrov.kh.ua

И.В. Чайка

ООО «ХОЛТЕК», а/я 119, г. Вышгород Киевской области, Украина, 07300

П.Г. Гакал, Р.Ю. Турна

Центр технической физики Национального аэрокосмического университета «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070

ПРИМЕНЕНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ХОЛОДИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

На основе диоксида углерода создаются эффективные низкотемпературные системы охлаждения. В них CO₂ применяется либо как хладагент в нижней ветви каскадной холодильной машины, либо как хладоноситель. Верхние ветви каскадов работают чаще всего на аммиаке или хладагенте R507. В качестве примеров практического использования сообщается: о создании холодильной установки для холодоснабжения низкотемпературных камер хранения крупного холодильного склада; о разработке системы утилизации холода при газификации жидкого CO₂ на крупном парниковом хозяйстве. Приводятся характеристики комплектующих для указанных систем. Для разработки и проектирования сложных холодильных машин и установок предлагается использовать системный подход к моделированию тепловых, гидравлических и других процессов.

Ключевые слова: Диоксид углерода. Хладагент. Хладоноситель. Насос. Теплообменники. Арматура. Компрессоры. Каскадная холодильная машина. Газификация жидкого CO₂.

G.A. Gorbenko, I.V. Chaika, P.G. Gakal, R.Yu. Turna

APPLICATION OF CARBON DIOXIDE IN REFRIGERATING TECHNOLOGIES

On a basis of carbon dioxide are created an effective low-temperature systems of cooling. In them CO₂ it is applied as a coolant in the bottom strand of the cascade refrigerating machine or as refrigerant. The top strands of cascades work more often on ammonia or coolant R507. As examples of practical use is informed: about creation of refrigerating plant for refrigeratory supply of low-temperature storage room on a large refrigerating warehouse; about system for utilization of cold at gasification liquid CO₂ on a large hotbed sector. Characteristics of components for the specified systems are resulted. For development and designing of complex refrigerating machines and plants it is offered to use the system approach to modelling thermal, hydraulic and other processes.

Keywords: Carbon dioxide. Coolant. Refrigerant. Pump. Heat-exchanger. Armature. Compressors. Cascade refrigerating machine. Gasification of liquid CO₂.

1. ВВЕДЕНИЕ

В различных системах охлаждения находят всё более широкое применение так называемые природные хладагенты: углеводороды, диоксид углерода и аммиак. Это вызвано ограничением и последующим запретом использования озоноразрушающих веществ в соответствии с Монреальским протоколом (1987 г.), а также внесением в него в 1990-ые годы ряда поправок и корректив, в которые были включены дополнительные, в том числе вызывающие парниковый эффект, хладагенты.

Аммиак является одним из лучших холодильных

агентов. Однако главный его недостаток — токсичность и взрывопожароопасность, неустраним. Углеводороды ещё более взрывопожароопасны, чем аммиак, поэтому их целесообразно использовать только в малых холодильных машинах, например, в бытовых холодильниках, или в технологическом оборудовании нефтехимических производств.

На этом фоне повышенный интерес к диоксиду углерода становится вполне объяснимым. Диоксид углерода имеет следующие достоинства: обладает высокой объёмной холодопроизводительностью, не токсичен и безопасен, инертен к материалам, дешёв и доступен. В таблице представлены некоторые свойства диоксида

углерода в сравнении с другими хладагентами.

Основные недостатки диоксида углерода, как следует из таблицы, — низкая критическая температура и высокие давления в области рабочих температур. Однако высокое давление определяет и преимущества CO_2 по сравнению с другими хладагентами:

1. Холодопроизводительность компрессора при заданной его объёмной производительности при работе на диоксиде углерода выше вследствие высокой плотности газа.

2. Падение давления в испарителях слабо влияет на изменения температуры кипения, так как кривая фазового перехода у CO_2 оказывается более крутой по сравнению с другими хладагентами. Это позволяет увеличить массовый расход хладагента через испаритель и тем самым повысить эффективность теплоотдачи.

Циклы холодильных машин, работающих на диоксиде углерода, могут осуществляться как в надкритических, так и в докритических областях [1].

В промышленных каскадных холодильных машинах в нижней ветви используют чаще всего докритический цикл, реализуемый на CO_2 . Как правило, в них в качестве хладагента верхней ветви применяется аммиак либо гидрофторуглероды (R410A, R407C, R507) [2].

Каскадные холодильные машины с аммиаком в качестве хладагента верхней ветви создавались для производства низкотемпературного жидкого диоксида углерода [3].

Для выработки холода указанные каскадные холодильные машины применяются уже более 10-ти лет. В них достигается не только повышение промышленной безопасности за счёт снижения количества аммиака, но и снижение энергопотребления на 10-15 % по сравнению с традиционными двухступенчатыми схемами.

Диоксид углерода используют в нижней ветви каскада в диапазоне температур от -55 до 0 °С, что соответствует давлениям от 5,7 до 35 бар. При этом нижняя ветвь холодильной машины может работать в различных режимах: непосредственное кипение диоксида углерода в испарителе; принудительная циркуляция CO_2 (с насосной подачей хладагента); охлаждение

потребителей с использованием CO_2 в качестве промежуточного хладоносителя.

2. КАСКАДНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ С CO_2 В НИЖНЕЙ ВЕТВИ

Рассмотрим особенности нескольких типов указанных холодильных машин. В случае непосредственного кипения пары CO_2 сжимаются в компрессоре и конденсируются в теплообменнике, который является одновременно испарителем для верхней ветви каскадной холодильной машины. Затем жидкий диоксид углерода через дроссель поступает в испаритель, где кипит при -40 °С. Образующиеся пары возвращаются в компрессор.

В случае использования принудительной насосной циркуляции (см. рис. 1) жидкий CO_2 из циркуляционного ресивера насосом подаётся в испарители нижней ветви каскада. После испарителей смесь жидкости и пара возвращается в ресивер CO_2 . Остальная часть контура каскадной холодильной машины такая же, как в схеме с непосредственным кипением, с той лишь разницей, что через РВИ двухфазный CO_2 поступает в циркуляционный ресивер.

При использовании диоксида углерода в качестве промежуточного хладоносителя (см. рис. 2), в нижней ветви каскада компрессор CO_2 не используется. Диоксид углерода подаётся в испарители насосом, а потом возвращается в циркуляционный ресивер. Пар конденсируется в теплообменнике R744/R717, представляющем собой конденсатор-испаритель. Аммиачная холодильная машина верхней ветви каскада в этом случае является двухступенчатой.

Температурам испарения и конденсации в нижней ветви каскадных холодильных машин соответствуют сравнительно высокие уровни давлений CO_2 . Эти давления в некоторых случаях значительно превышают допустимые значения для типовых элементов холодильных машин. Поэтому некоторые фирмы разработали для холодильных машин оборудование, предназначенное для работы с CO_2 . Так, швейцарская фирма «Alfa Laval» предлагает воздухоохладители с рабочим давлением до 50 бар на CO_2 (см. рис. 3,а). Холодопроизводительности воздухоохладителей промышленной

Свойства диоксида углерода в сравнении с другими хладагентами

Тип хладагента	HFC	Углеводороды		NH_3	CO_2
Хладагент	R134a	R290	R600a	R717	R744
Общепринятое название	Фреон-134a	Пропан	Изобутан	Аммиак	Диоксид углерода
Природа хладагента	искусственный	природный	природный	природный	природный
Потенциал разрушения озонового слоя (ODP)	0	0	0	0	0
Потенциал глобального потепления (GWP)	3200	3	3	0	1
Критическая температура, °С	101,2	97	135	132,4	31,1
Критическое давление, бар	41	42	36	113	74
Горючесть	—	+	+	+	—
Токсичность	—	—	—	+	—
Относительная удельная объёмная холодопроизводительность при сопоставимых условиях	1	1,4	0,6	1,7	8,4

серии составляют от 8 до 155 кВт, а коммерческой — от 2 до 56 кВт. Компанией созданы меднопаяные пластинчатые теплообменники серии АСН-СВН с рабочим давлением от 45 до 49 бар и холодопроизводительностью от 4 до 500 кВт (рис. 3,б), а также полуварные пластинчатые теплообменники с рабочим давлением 40 бар и с холодопроизводительностью до 10500 кВт.

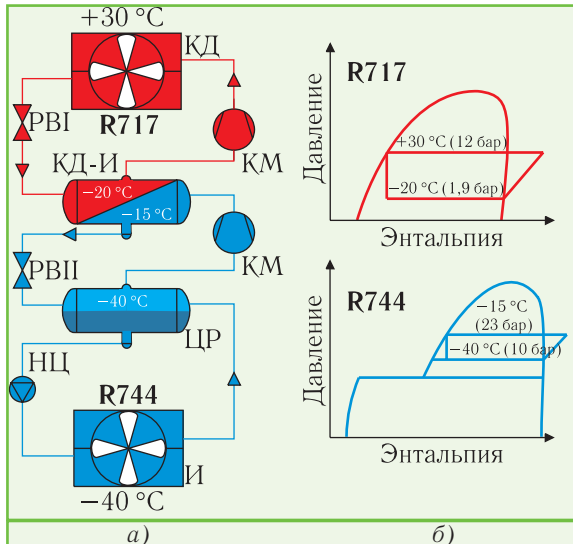


Рис. 1. Схема каскадной холодильной машины с принудительной насосной циркуляцией CO_2 (а) и термодинамические циклы верхней и нижней ветвей (б): КМ — компрессоры; КД — конденсатор; РВИ, РВП — регулирующие вентили; КД-И — конденсатор-испаритель; ЦР — циркуляционный ресивер; НЦ — циркуляционный насос; И — испаритель

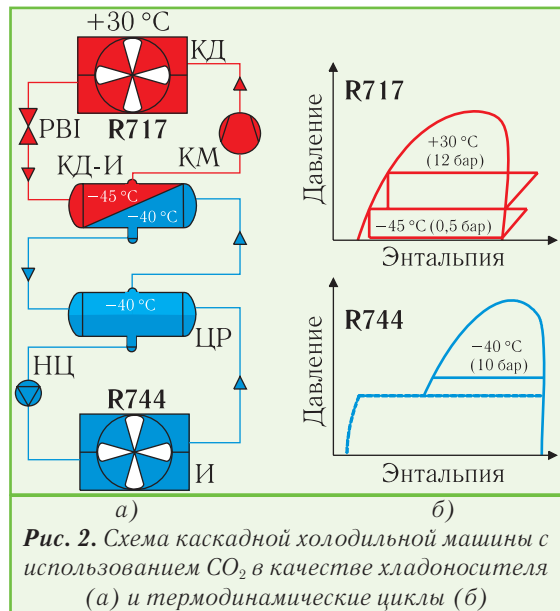


Рис. 2. Схема каскадной холодильной машины с использованием CO_2 в качестве хладагента (а) и термодинамические циклы (б)

Наиболее сложным и важным элементом холодильной машины, в которой CO_2 используется в качестве хладагента, является компрессор. В каскадных промышленных системах наибольшее применение получили поршневые и винтовые компрессоры от-

рытого типа. На рынке холодильного оборудования компрессоры для CO_2 сегодня предлагают многие ведущие мировые компании: «Grasso», «York», «Mucot» и др. Компания «Grasso» представила ряд поршневых компрессоров для CO_2 серии 5НР с рабочим давлением до 50 бар. Объёмная их холодопроизводительность — от 100 до 200 м³/ч. Компанией «York» для работы на CO_2 предлагаются поршневые компрессорные агрегаты высокого давления серии НРО/НРС с холодопроизводительностью от 140 до 690 кВт (при температуре испарения -40°C и конденсации -5°C). Компания «Mucot» изготавливает серию каскадных холодильных машин ЕК-НСС с непосредственным кипением CO_2 в нижней ветви и серию машин ЕК-ССУ, в которых в нижней ветви каскада CO_2 используется как хладоноситель. Компания «Grasso» производит модульные каскадные холодильные машины на базе винтовых компрессоров с холодопроизводительностью от 250 до 1000 кВт.

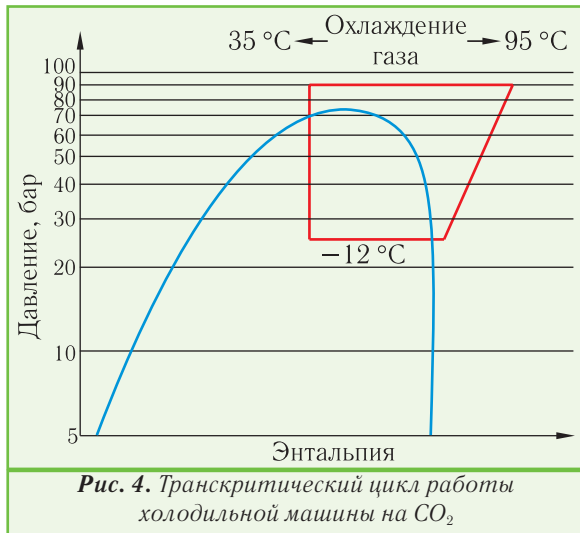
В последнее время возрос интерес к полугерметичным компрессорам. Их применение позволяет значительно удешевить перспективные установки коммерческого назначения. Компания «Bitzer» представила ряд полугерметичных поршневых компрессоров, спроектированных как для докритического, так и транскритического циклов, реализуемых на CO_2 . Серия компрессоров для докритического цикла имеет холодопроизводительность от 5 до 90 кВт; компрессоры, работающие в транскритическом цикле, — холодопроизводительность от 15,6 до 42,3 кВт.

В транскритическом цикле процессы лежат как в надкритических, так и докритических областях (см. рис. 4). Давление может изменяться от 30 до 100 и более бар. Холодильный коэффициент системы с транскритическим циклом, работающей на CO_2 , выше чем у традиционных систем, работающих на фреонах [4]. Транскритические циклы на CO_2 в настоящее время используются для создания холодильных машин с малой холодопроизводительностью, например, для систем транспортного кондиционирования, тепло-



Рис. 3. Воздухоохладители (а) и меднопаяные пластинчатые теплообменники (б) фирмы «Alfa Laval» с рабочим давлением 50 бар

вых насосов малой производительности и холодильных систем супермаркетов [5].



Условия работы холодильных машин с CO_2 значительно отличаются от традиционных, что требует разработки новых их компонентов. Основным производителем запорной и регулирующей арматуры для транскритических и докритических циклов на CO_2 является компания «Danfoss».

В Украине двухконтурная каскадная холодильная установка с использованием диоксида углерода впервые была построена по проекту финской компании «Huangre» в 2006 г. Система предназначена для холодоснабжения низкотемпературных камер холодильного склада площадью более 10000 м² (около 15000 т замороженной рыбной продукции).

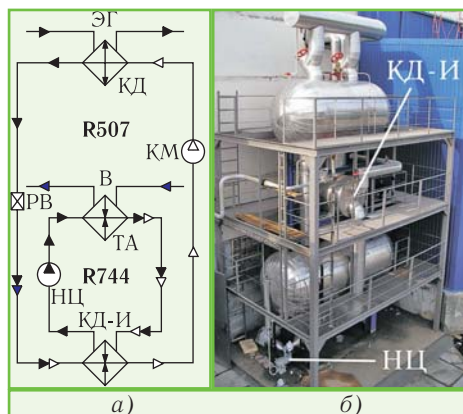


Рис. 5. Принципиальная схема системы холодоснабжения низкотемпературных камер холодильного склада (а) и внешний вид части оборудования холодильной установки (б):
 KM — компрессор; КД — конденсатор;
 PB — регулирующий вентиль;
 И — испаритель CO_2 ; КД-И — конденсатор-испаритель (конденсация CO_2 при кипении хладагента R507);
 HЦ — циркуляционный насос жидкого CO_2 ; ЭГ — этиленгликоль; В — воздух

Компанией «Остров» на условиях субподряда был произведён монтаж холодильной установки и электрических сетей холодильного склада. В основе холодильной установки — три параллельно включённых винтовых компрессорных агрегата компании «Grasso» общей холодопроизводительностью 1050 кВт, работающих на хладагенте R507 (азеотроп R125/R143a) в верхней ветви каскада. Диоксид углерода используется в качестве промежуточного хладоносителя для распределения холода по камерам хранения. Заправка холодильной установки CO_2 — 8 т. В конденсаторах в качестве хладоносителя применяется 35 %-ый водный раствор этиленгликоля. Его охлаждение осуществляется в сухих градирнях. Тепло конденсации частично используется для обогрева грунта под полами в холодильных камерах и для оттайки воздухоохлаждателей. Такая схема утилизации тепла позволяет экономить энергию при эксплуатации камер. Принципиальная схема холодильной установки представлена на рис. 5.

Для этой установки компанией «Остров» спроектирована, изготовлена и смонтирована система аварийного захлаживания CO_2 в ресивере, которая включается в работу автоматически при остановке основной холодильной установки или при полном обесточивании предприятия. Аварийная система состоит из автономного источника питания, холодильного фреонового агрегата малой мощности (2,5 кВт холодопроизводительности) и внешнего конденсатора CO_2 . Аварийная система ограничивает повышение давления в ресивере при обесточивании предприятия, чем исключается разгерметизация системы и выброс CO_2 в атмосферу.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CO_2 В ПАРНИКОВОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Диоксид углерода применяется в пищевой про-

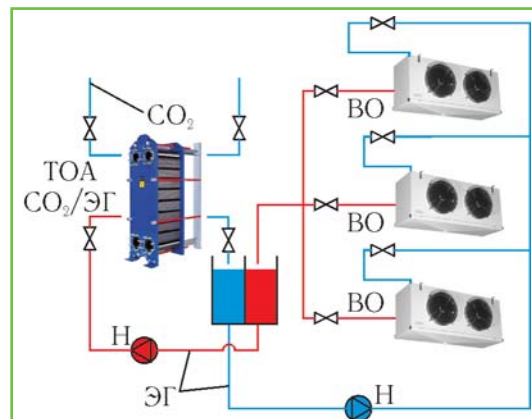


Рис. 6. Принципиальная схема системы утилизации холода при газификации CO_2 :
 ЭГ — контур этиленгликоля;
 CO_2 — контур диоксида углерода;
 TOA $CO_2/ЭГ$ — теплообменный аппарат диоксид углерода/этиленгликоль;
 BO — воздухоохлаждатели;
 H — насосы для циркуляции этиленгликоля

мышленности для производства, хранения и переработки сельхозпродукции. Например, современные технологии ведения парниковых хозяйств предусматривают обогащение атмосферы CO_2 . Резкое возрастание цены на природный газ сделало экономически невыгодным его использование для сжигания и получения CO_2 в летнее время, когда нет потребности в тепле.

Некоторые крупные парниковые хозяйства закупают на заводах жидкий CO_2 , газифицируют и подают его в парники. На одном из крупных парниковых хозяйств в Киевской области планируется газифицировать и расходовать до 4 т/ч жидкого CO_2 . В стандартных установках газификации CO_2 холод полезно не используется. Компания «Остров» спроектировала систему утилизации холода, принципиальная схема которой представлена на рис. 6. При максимальном расходе CO_2 установка утилизирует до 380 кВт холода. Его используют для поддержания заданных температурных режимов в цехе сортировки и камерах хранения продукции. Дополнительной поставкой является холодильная машина для предотвращения потерь CO_2 при длительном его хранении в изотермической ёмкости.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Подобные и более сложные холодильные установки целесообразно проектировать с использованием системного подхода к моделированию тепловых, гидравлических и других процессов. Это вызвано многоэлементностью и разветвлённостью технических систем, сложностью и многообразием процессов, которые в них реализуются. В Центре технической физики разработана методика математического моделирования рабочих процессов в таких системах. Реальные элементы технической системы в этой методике замещаются идеализированными, отображающими одно или несколько свойств реального элемента. В

результате каждый идеализированный элемент описывается одним или несколькими уравнениями сохранения массы, энергии и импульса или уравнением теплопередачи.

Для решения системы уравнений используются стандартные методы или численного интегрирования, если задача нестационарная, или решения системы нелинейных алгебраических уравнений, если задача стационарная.

Разработанный подход к математическому моделированию используется при решении следующих задач: обоснование работоспособности, надёжности и экономичности инженерных решений на этапе проектирования; проектирование систем автоматического управления и регулирования; прогнозирование поведения системы в нештатных ситуациях и аварийных режимах.

Данный подход успешно использовался, в частности, при проектировании разветвлённых многоэлементных холодильных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартыновский В.С. Холодильные машины (Термодинамические процессы). — М.: Пищепромиздат, 1950. — 263 с.
2. Железный В.П., Жидков В.П. Эколого-энергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике. — Донецк: Изд-во «Донбасс», 1996. — 144 с.
3. Пименова Т.Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. — М.: Лёгкая пищевая промышленность, 1982. — 208 с.
4. ASHRAE Position Document on Natural Refrigerants. January 28, 2009. — 10 p.
5. David Hinde, Shitong Zha, Lin La. Carbon dioxide in North American supermarkets// ASHRAE Journal. — Vol. 51. — February, 2009. — P. 18-26.

MVK www.MVK.ru +7 495 995-05-95

VIII Международный Форум
PCVEXPO
[WWW.PCVEXPO.RU](http://www.pcvexpo.ru)

**НАСОСЫ
 КОМПРЕССОРЫ
 АРМАТУРА
 ПРИВОДЫ И ДВИГАТЕЛИ**

13-16 ОКТЯБРЯ 2009
 РОССИЯ, МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

КОНТАКТЫ ДИРЕКЦИИ ФОРУМА: Тел./Факс: (495) 925-34-82, E-MAIL: PCVEXPO@MVK.RU

Параллельно пройдут выставки:

Организаторы Форума:
 ЗАО «МВК»
 Российская Ассоциация производителей насосов
 Ассоциация компрессорщиков и пневматиков
 Научно-Промышленная Ассоциация Арматуростроителей

Под патронатом:
 Правительства Москвы
 Московской Торгово-промышленной палаты