УДК 621.564

СТАТУС-КВО С ЗАМЕНОЙ ХЛАДАГЕНТА R-22

Джеймс М. Калм, П. А. Доманский
Инженер - Консультант, США, Национальный институт стандартов и технологий, США ■

С момента появления R-22 в 1928 г. и организации его широкого производства в 1936 г. этот хладагент применялся в разнообразных системах от самых маленьких оконных кондиционеров до крупных чиллеров и тепловых насосов, включая системы для районного централизованного охлаждения и отопления. Холодопроизводительность отдельных видов оборудования, использующих этот универсальный хладагент, колеблется от 2 кВт до 33 МВт (с заправкой R-22 от 0,5 до 9500 т). R-22 используется в поршневых, роторных, спиральных, винтовых и центробежных компрессорах и экспериментально – в абсорбционных системах. Ни один другой хладагент не достигал такого разнообразия коммерческого применения и такого широкого диапазона холодопроизводительности.

Однако R-22 является одним из химических веществ класса хлорфторуглеводородов (HCFCs), производство которых прекращается в соответствии с Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой [1, 2]. Регулирующие меры Протокола направлены на потребление, которое складывается из производства и импорта за минусом экспорта и уничтожаемого количества R-22. Протокол не ограничивает использование в будущем уже изготовленных или импортированных химических веществ, а именно, хладагентов, которые уже или повторно используются или заготовлены до принятого срока ликвидации. Протокол также не ограничивает использование химических веществ в качестве перерабатываемого сырья (полупродукта при производстве других химикатов).

В табл. 1 указаны предельные сроки производства и ввоза R-22 согласно Монреальскому протоколу и потребности в нем в Канаде и в США. Указанные сроки относятся к полному прекращению, хотя и более раннее прекращение производства или шаги по его постепенному сокращению возможны. Некоторые страны, особенно в Европе, выполняют график быстрее.

Из-за широкого применения R-22 оборудование, спроектированное на этом хладагенте, будет использоваться еще не одно десятилетие, после того как его производство прекратится.

Для эксплуатации оборудования на R-22 будут использоваться ограниченные лимиты его производства, запасы, имевшиеся до прекращения его производства, и хладагент R-22, который будет извлечен из перепрофилированного или выведенного из эксплуатации оборудования. Имеются варианты использования заменителей R-22, причем некоторые из них специально разработаны, чтобы упростить переходный период, и не предназначены для использования в качестве основных хладагентов.

В европейских странах существуют более жесткие ограничения. В ряде стран уже запретили использование и работу с R-22 или запретят к определенному сроку, исходя из типа или габаритов оборудования. В то же время Монреальский протокол разрешает развивающимся странам, обозначенным в Статье 5(1), в зависимости от уровня использования контролируемых веществ продолжить применение R-22 до 2040 года.

Варианты замены R-22

Не существует ни одного чистого хладагента, который бы мог прямо заменить R-22. Производители уже предлагают восемь смесей хладагентов для эксплуатации существующего оборудования (при его соответствующем перепрофилировании) и несколько дополнительных смесей для нового оборудования. Число смесей превысит 20 для конверсии и более 10 для нового оборудования, если принять во внимание хладагент R-502 (ранее широко используемая смесь для низкотемпературных и коммерческих систем, содержащая R-22). Эти смеси представлены в табл. 2.

Таблица 1. Сокращение производства и импорта R-22 к 1 января указанного года по Монреальскому протоколу

Страны	Новое оборудование	Существующее оборудование
Развитые страны	2020*	2030
Страны Статьи 5(1)	2040*	2040
США** и Канада	2010	2020

* Протокол налагает постепенное снижение (с фиксацией в 2015 г. только для стран Статьи 5(1) общего потребления HCFC, но позволяет отдельным странам самим определять выполнение требований, основанных на лимитах для отдельных веществ (в зависимости от их разрушительного действия на озоновый слой (ODP) и их использования).

** В соответствии с Законом о чистом воздухе (CAAA) от 1990 г. и предписанием 40 CFR 82.

J. M. Calm and P. A. Domanski, "R-22 Replacement Status," *ASHRAE Journal*, 46(8):29-39, August 2004; translation to Russian by O. B. Tsvetkov as "Статус – Кво С Заменой Хладагента R-22" in Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (Известия СПбГУНиПТ), Russia, УДК 621.564, ISSN 1995-2724, 2008(1):28-36, 2008

Таблица 2. Смеси-заменители хладагентов R-22 и R-502

Заменяемые хладагенты	Заменяющие хладагенты для	
	существующего оборудования	нового оборудования
R-22	R-407C, R-411A, R-417A, R-419A, R-421A, R-421B	R-407C, R-407E, R-410A, R-410B углеводороды
R-502	R-402A, R-402B, R-403A, R-403B, R-404A, R-407A, R-407B, R-408A, R-411B, R-422A, R-507A	R-407A, R-404A, R-507A, R-509A, углеводороды

Фирмы, занимающиеся низкотемпературными системами и системами кондиционирования воздуха, организовали совместный поиск альтернатив R-22. Их усилия дополнили обширные исследования и разработки отдельных производителей хладагентов и оборудования, проводимые в университетах и других исследовательских организациях, а также в лабораториях, пользующихся государственной поддержкой. Эта международная программа называлась «Программа оценки хладагентов, альтернативных R-22 (AREP)». В нее вошел и японский двойник JAREP. Задачей программы было исключить дублирование работ и растрачивание ограниченных ресурсов при оценке вариантов замены.

В работе принимали участие 39 компаний – из Европы, Японии и Северной Америки. Они делились теоретическими результатами и экспериментальными данными, полученными как при калориметрических опытах и испытаниях оборудования по схеме «drop-in» (минимальные переделки), так и при разработке конструкций, оптимизированных под хладагент.

AREP рассмотрел 14 хладагентов, отобранных в качестве потенциальных кандидатов для замены R-22. В список вошли: R-134a; R-32/R-125 (60/40 масс. %); R-32/R-134a (20/80, 25/75, 30/70 и 40/60); R-32/R-227ea (35/65); R-125/R-143a (45/55); R-32/R-125/R-134a (10/70/20 [R-407B]), (30/10/60) и (24/16/60); R-32/R-125/R-290/R-134a (20/55/5/20). Также в список были включены R-290 (пропан) и R-717 (аммиак), хотя реально количество тестов с ними было ограничено. Дополнительно в списке кандидатов есть четыре замены R-502, а именно: R-125/R-143a (45/55); R-32/R-125/R-134a (20/40/40 [R-407A]); R-125/R-143a/R-134a (10/45/45) и R-125/R-143a/R-134a (44/52/4 [R-404A]).

Основываясь на данных этого поиска, большинство производителей малых компрессоров и агрегатированного оборудования выбрали бинарную смесь R-32/125, которая имеет состав R-32/R-125 (50/50) [R-410A], чтобы максимально увеличить эффективность и в то же время, избежать воспламеняемости. Эта квази-азеотропная смесь работает при более высоких давлениях конденсации (приблизительно на 60 % выше, чем у R-22 в системах с воздушным охлаждением), но обеспечивает снижение габаритов оборудования. Трехкомпонентная смесь R-32/R-125/R-134a тоже конкурентоспособна, если использовать соотношения компонентов, выбранные так, чтобы приблизиться к кривой насыщения хладагентов R-22 и R-502. В связи с этим смесь R-32/R-125/R-134a (30/10/60) представляет большой интерес как тактический вариант этого рабочего вещества, но позднее состав смеси изменили на R-32/R-125/R-134a (23/25/52) [R-407C], чтобы уменьшить опасность воспламеняемости при фракционировании.

Программа AREP была направлена лишь на предварительную оценку заменителей R-22. Ряд фирм-изготовителей оценили конкурентоспособность методов проектирования и оптимизации существующего оборудования. Б.Х. Минор [3] публикует исчерпывающий литературный обзор испытаний и необходимых изменений в действующем оборудовании, в частности, в конструкциях компрессоров, теплообменников, регулирующих устройств и смазки. Проведенные испытания показали, что R-410A имеет одинаковую или лучшую энергоэффективность по сравнению с R-22. Для систем охлаждении наблюдалось ее увеличение на 1 – 7 % и для систем обогрева – от уменьшения эффективности на 3 % до повышения на 7 %.

Инфраструктура сервиса компрессоров и регулирующих устройств для коммерческих систем практически унифицирована, однако для крупных установок имелись особенности.

Хладагент R-134a является самой распространенной заменой в чиллерах, имеющих винтовые компрессоры холодопроизводительностью 175 – 1500 кВт (с заправкой 50 – 400 т хладагента) как с воздушным, так и с водяным охлаждением. Другие варианты использования включают R-410A и ограниченно (прежде всего, в Европе) R-717 (аммиак) и R-1270 (пропилен). Постепенно ослабевает прежний интерес к ускоренному выводу на рынок R-407C и даже R-404A. Рассматриваются и другие смеси, также использующие R-134a, чтобы заменить поршневой и винтовой компрессоры очень компактным центробежным компрессором, приводимым в действие инверторным преобразователем, что даст значительно более высокую эффективность при одинаковой мощности.

Сохраняется интерес, особенно в Европе, к R-407C для чиллеров с водяным охлаждением. Хотя его

эффективность, как правило, может быть ниже (до 7 %), чем у R-22 в традиционных конструкциях, рассматривают две разработки. Так, использование регенеративного теплообменника может повысить эффективность на 2 %. Большую эффективность можно получить, если воспользоваться интенсивным температурным глайдом R-407C от 4 до 5 ºС (в процессах кипения и конденсации). До 5 % роста эффективности можно получить, используя противоточные теплообменники, чтобы приблизиться к термодинамическому циклу Лоренца, который позволяет использовать температурный глайд для испарителей и конденсаторов противоточного типа.

Воздействие на окружающую среду

Хотя решение исключить использование хладагента R-22 основано на его способности разрушать атмосферный озоновый слой, при поиске альтернатив следует также принимать во внимание и другие аспекты, связанные с воздействием хладагентов на окружающую среду. В табл. 3 сравниваются срок существования хладагента в атмосфере Земли ($\tau_{атм}$), потенциал разрушения озонового слоя (ODP) и потенциал глобального потепления (GWP) для R-22 с теми же показателями для альтернативных хладагентов.

Время τатм указывает время пребывания хладагента в атмосфере Земли до тех пор, пока он не разложится, не среагирует с другими химическими веществами, не будет вымыт дождями или не будет удален каким-либо иным способом. Эта величина представляет собой, таким образом, среднее время пребывания хладагента в атмосфере и, следовательно, возможность его накопления. Длительный срок существования хладагентов в атмосфере не исключает постепенное восстановление окружающей среды, как всеми известными способами, так и теми, которые могут появиться в будущем, однако, хладагенты с коротким сроком существования в атмосфере предпочтительны.

Строго говоря, продолжительность «жизни» хладагентов, приведенных в табл. 3, различна для тропосферы (нижнего атмосферного слоя, в котором мы живем), стратосферы (следующего слоя, в котором истощение озонового слоя вызывает особое беспокойство) и более высоких слоев, поскольку основные механизмы избавления от хладагентов в этих слоях неодинаковы.

Как известно, ODP – стандартизованный безразмерный показатель (относительно R-11), характеризующий способность хладагентов и других химических веществ разрушать молекулы стратосферного озона. Приведенные данные являются величинами, принятыми международной научной экспертной оценкой. Значения ODP для смесей определяются как среднее значение ODP компонентов с учетом их массовых долей.

Потенциалы ODP и GWP рассчитаны с учетом τатм, а также по данным измерений химических свойств и других атмосферных параметров. Значения τатм, ODP и GWP для хладагента должны быть как можно ниже, однако они должны сочетаться с оценками эксплуатационных качеств хладагента, его безопасности, химической и тепловой стабильности при использовании [4].

Сравнение эффективности

Для сравнения эффективности хладагентов выбраны пять факторов:

Термодинамические свойства

1. Насколько далеко от критической точки реализован холодильный цикл (это влияет на отношение скрытой теплоты парообразования к удельной теплоемкости жидкости при постоянном давлении).

2. Наклон кривых насыщения жидкости и пара, по которому определяют результативность перегрева, переохлаждения и дросселирования. На наклон кривых существенно влияет мольная теплоемкость.

Таблица 3. Некоторые свойства хладагента R-22 и его заменителей [4–6]

Хладагент	Срок существования в атмосфере, $\tau_{атм}$	ODP	GWP (для 100 лет)
R-22	12	0,034	1780
R-134a	14	0	1320
R-407C	–	0	1700
R-407E	–	0	1400
R-410A	–	0	2000
R-32	4,9	0	543
R-32/R-600 (95/5)	–	0	520
R-32/R-600 (90/10)	–	0	490
R-290 (пропан)	–	0	~20
R-717 (аммиак)	–	0	<1
R-744 (диоксид углерода)	≥50	0	1
R-1270 (пропилен)	–	0	~20

Примечание: $\tau_{атм}$ смесей не указаны (–), так как в атмосфере они разделяются на компоненты.

Свойства переноса

3. Теплопроводность и вязкость, которые обусловливают теплообмен и гидравлические потери.

Особенности применения

4. Влияние на интенсивность теплообмена температурного глайда и конфигурации теплообменника.

5. Возможность оптимизации цикла путем регулирования перегрева, переохлаждения, использования экономайзера и таких элементов, как теплообменники на жидкостном или всасывающем трубопроводах.

На рис. 1 показаны диаграммы T – s для R-22 и его заменителей, которые должны облегчить качественную оценку воздействия термодинамических свойств на холодильный коэффициент. Кривые насыщения показаны как безразмерные величины, имеющие одинаковую ширину двухфазного купола (то есть, для насыщенной жидкости s* = 0, для насыщенного пара s* = 1). Заметим, что критическая температура для R-134a выше, чем для R-22. Подобная картина наблюдается для критических температур хладагентов R-410A и R-125. При одинаковых температурах кипения и конденсации цикл, использующий R-134a, находится дальше от критической точки, чем цикл на R-22, и гораздо ниже, чем циклы на R-410A и R-125.

На рис. 2 изображен цикл парокомпрессионный холодильный установки в диаграмме T – s. Холодопроизводительность цикла представлена площадью под линией кипения, а работа цикла – площадью под кривыми конденсации и перегрева, за минусом области, обозначающей холодопроизводительность. Если сравнить этот цикл с циклом Карно, то необратимость, возникающая при дросселировании, уменьшает холодильный эффект на величину площади, расположенной под линией 4C–4R. Эта площадь также указывает на дополнительно затраченную работу из-за дросселирования (потерянная работа расширения). Дополнительная работа из-за необратимости перегрева пара обозначается областью 2–2C–2R. На необратимость процессов дросселирования и перегрева пара также влияет наклон кривых насыщения. Потери от необратимости значительно выше вблизи критической точки, где линии насыщения постепенно становятся более пологими, формируя двухфазный купол.

Критическая температура R-410A ниже, чем у R-22. По этой причине, необратимость из-за перегрева пара и необратимость, вызванная дросселированием, выше для R-410A, чем для R-22. Из двух компонентов смеси R-410A хладагент R-32 дает более высокую термодинамическую эффективность, чем R-125 для интересующих нас условий. В свою очередь R-125 нивелирует воспламеняемость R-32. Хладагент R-125 также повышает GWP смеси. Другие смеси с R-32 также вызывают интерес. Так, R-32/R-600 (95/5) и R-32/R-600a (90/10) включены в табл. 3 и 4 для сравнения. Эти азеотропные смеси R-32 с n-бутаном и изобутаном имеют превосходство в холодопроизводительности [7] и могли бы использоваться с минеральными маслами. К сожалению, эти смеси легко воспламеняются.

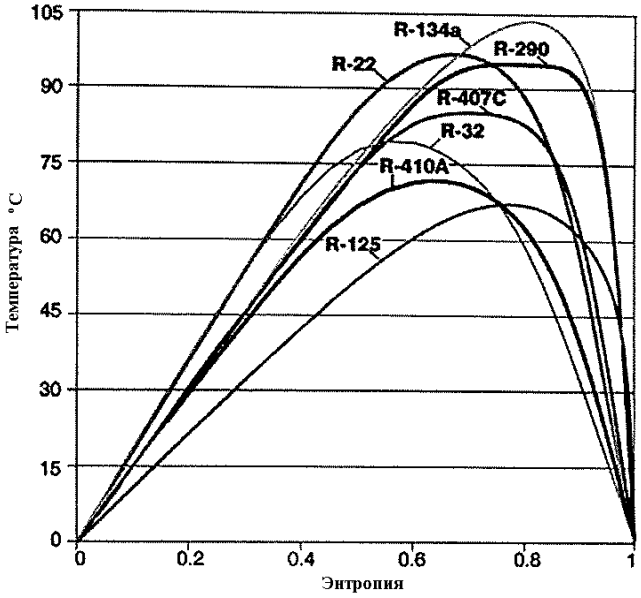

Рис. 1. Диаграмма T-s для R-22 и его заменителей

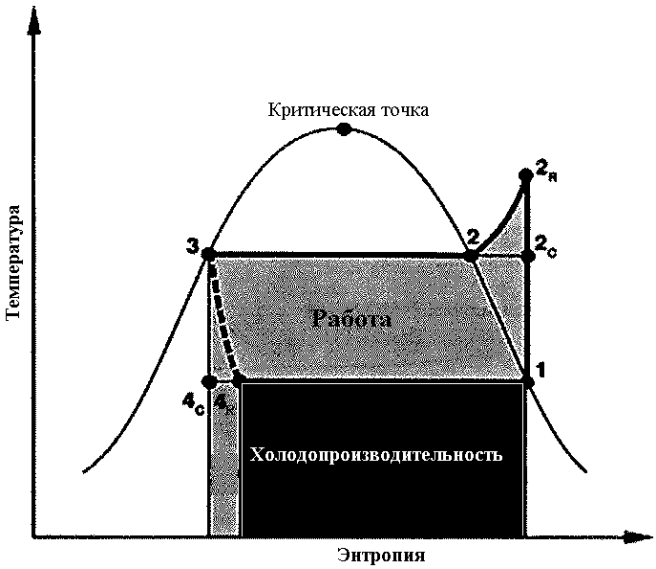

Рис. 2. Парокомпрессионный холодильный цикл в диаграмме T-s (точки: 1, 2R, 3, 4R –парокомпрессорный холодильный цикл; точки: 1, 2C, 3, 4C – цикл Карно)

Термодинамическое моделирование позволяет оценить эффективность, которую можно достичь в теоретических циклах, игнорируя влияние свойств переноса, практических особенностей и смазочных масел. В табл. 4 и 5 представлены результаты расчетов эффективности выбранных заменителей R-22 для систем агрегатированных кондиционеров и чиллеров с водяным охлаждением в одноступенчатых циклах. В таблицах даны значения холодильного коэффициента и показатели цикла, которые часто используются при оценке эффективности.

Хладагенты, имеющие незначительные коэффициенты теплоотдачи, не могут работать также хорошо, как те, у которых коэффициенты теплоотдачи выше, несмотря даже на термодинамическое преимущество. Однако усовершенствование конструкции может нивелировать это различие. Точно также смеси с большим глайдом, например, R-407C, могут не достигать производительности, указанной для конструкций теплообменников с поперечным потоком (например, для воздуха и, реже, для воды, движущейся перпендикулярно потоку хладагента), но могут превзойти ее в теплообменниках с противотоком.

Использование R-134a в чиллерах дает более высокую эффективность, чем R-22. Что касается других заменителей, производители сумели усовершенствовать конструкции оборудования, чтобы компенсировать потери эффективности.

Обратимся к литературным источникам. В [8, 9] показаны некоторые варианты более низкой теоретической эффективности. Из [10] видно, что у хладагента R-410A наблюдается относительное ухудшение эффективности по сравнению с R-22 при высоких температурах конденсации, хотя производительность R-410A сравнима с производительностью R-22 при типичных рабочих режимах. В [11] рассматривается влияние перепада давления и теплообмена на повышение эффективности. Предложены интересные способы достижения более высокой эффективности при использовании азеотропных или квазиазеотропных смесей R-32 с углеводородами и возвращение к использованию минеральных смазочных масел, хотя подобные смеси являются легко воспламеняющимися [7].

Существует много противоречивых работ по эффективности диоксида углерода (R-744, CO_2). Одна из причин этого состоит в том, что в большинстве случаев необходим сверхкритический, а не традиционный парокомпрессионный цикл. Этот давно известный хладагент действительно предпочтителен в некоторых случаях. Примером является нижняя ступень каскадной холодильной установки, где чаще всего диоксид углерода заменяет аммиак. В работе [12] детально оценивается применение CO_2 в жилых помещениях, где используют модели как традиционных парокомпрессионных, так и

Таблица 4. Сравнение эффективности хладагентов для агрегатированных кондиционеров

Параметры цикла	Идеальный цикл*	Типовые условия**
Средняя температура кипения, °C	10	10
Перегрев, °C	0	5
Средняя температура конденсации, °C	35,0	46,1
Переохлаждение, °C	0	5
Изоэнтропный КПД компрессора, %	100	70
КПД двигателя, %	100	90
Хладагент	*Холодильный коэффициент*	
R-22	9,85	4,60
R-32	9,55	3,84
R-134a	9,86	4,13
R-290 (пропан)	9,68	4,05
R-407C	9,60	3,97
R-407E	9,67	4,00
R-410A	9,29	3,77
R-32/R-600 (95/5)	9,54	3,85
R-32/R-600a (90/10)	9,43	3,81

* Режимы соответствуют стандартным номинальным данным для агрегатирован-ных кондиционеров и тепловых насосов [13]. Номинальный стандарт оговаривает температуры воздуха на входе: наружную (35,7 °C) и в помещении (26,7 °C), на практике температура кипения снижается до 10 °C для осушения воздуха. Расчеты сделаны по программе CYCLE D_3.0 [14].

** Режимы приближаются к характерным для цикла. Приведенные типичные КПД могут быть превышены оптимизацией переохлаждения и перегрева, использованием нескольких ступеней или другими подобными видоизменениями икла. Плохая конструкция может привести к снижению производительности. Характерный перегрев и переохлаждение зависят от хладагента, приведенные значения даны в качестве примера для сравнения.

Таблица 5. Сравнение эффективности хладагентов для чиллеров с водяным охлаждением

Параметры цикла	Идеальный цикл*	Типовые условия3**
Средняя температура кипения, °С	6,7	5,0
Перегрев, °С	0	1
Средняя температура конденсации, °С	29,4	35,0
Переохлаждение, °С	0	5
Изоэнтропный КПД компрессора, %	100	80
КПД двигателя, %	100	95
Хладагент	*Холодильный коэффициент*	
R-22	10,92	6,18
R-32	10,64	5,97
R-123	11,42	6,52
R-134a	10,93	6,24
R-407C	10,69	6,09
R-410A	10,42	5,90
R-717 (аммиак)	11,21	6,24
R-1270 (пропилен)	10,72	6,10

* Режимы соответствуют стандартным номинальным данным для чиллеров с водяным охлаждением [15]. Расчеты сделаны по программе CYCLE_D 3.0 [14].

** Режимы приближаются к характерным для цикла. Приведенные типичные КПД могут быть превышены оптимизацией переохлаждения и перегрева, ис-пользованием нескольких ступеней или другими подобными видоизменениями цикла. Плохая конструкция может привести к снижению производительности. Характерный перегрев и переохлаждение зависят от хладагента, приведенные значения даны в качестве примера для сравнения.

транскритических циклов. Авторы упомянутых работ приходят к выводу, что диоксид углерода приводит к значительно более низкой эффективности, когда используются равноценные теплообменники. Возможно предположить, что лучшие свойства переноса и часто провозглашенное увеличение изоэнтропного КПД компрессора не компенсирует термодинамический ущерб. Этот недостаток, видимо, будет еще заметнее в будущем.

Углеводороды представлены пропаном (R-290) и пропиленом (R-1270), эффективность применения которых представлена в табл. 4 и 5. Главным ограничением для углеводорода является безопасность.

Эффективность углеводородов рассматривается по двум соображениям. Во-первых, это внимание к глобальному изменению климата, которое потребует значительного улучшения эффективности, чтобы снизить связанные с производством энергии выбросы парниковых газов. Во-вторых – минимальный уровень эффективности, который допустим для агрегатированного оборудования (именно там, где больше всего используется R-22),

в США увеличится на 30 % за то время, пока идет отказ от использования R-22 в новом оборудовании.

В работе [16] дана оценка эффективности для кандидатов на замену R-22 из ряда гидрофторэфиров (HFE), включая смеси гидрофторэфиров с хлорфторуглеродами (HFE + HFC), которые предложены для замены R-22. Авторы [16] пришли к выводу, что расчетные показатели циклов заменителей составляют от 80 до 90 % от уровня для R-22. Найдено, что RE-125 (CHF2OCF3) и его трехкомпонентные смеси с R-32, R-134a или R-152a являются самыми перспективными кандидатами на замену R-22, но даже в этом случае эффективность цикла не превысит 90–93 % от показателей для R-22.

Соображения безопасности

Хладагенты из фторорганических соединений были созданы, чтобы повысить безопасность. Сокращая производство этих основных хладагентов, включая R-22, ученые вернулись к рассмотрению так называемых «природных хладагентов». К ним относят аммиак, углекислый газ и углеводороды. Аммиак (R-717) очень перспективен благодаря его высокой эффективности и низкой стоимости (см. табл. 5). Аммиак – самый используемый хладагент при технологической обработке пищевых продуктов, напитков, в холодильном хранении. Токсичность (особенно разъедающее действие на кожу) и воспламеняемость аммиака делают проблемным его использование в комфортных системах. Углекислый газ (R-744) – один из исторически первых хладагентов – используется в промышленных холодильных установках. Однако R-744 работает при гораздо более высоких давлениях, чем R-22 и требует реализации сверхкритических циклов, так как обычная температура конденсации превышает его критическую температуру. Углеводороды, особенно этан (R-170), пропан (R-290), n-бутан (R-600), изобутан (R-600a), этилен (R-1150) и пропилен (R-1270), имеют хорошую эффективность и придают такие же свойства некоторым фторсодержащим соединениям. Углеводороды имеют довольно низкую цену и считаются приемлемыми с точки зрения окружающей среды, однако крайне легко воспламеняются, и создают серьезные проблемы безопасности.

Использование углеводородов сопряжено с особым вниманием к обеспечению безопасности.

Применяют углеводороды в основном в Европе, как в малых установках (например, для замены R-12 в домашних холодильниках и охладителях для напитков), так и в больших системах. Аммиак и пропилен используют в чиллерах с водяным охлаждением и с защищенными машинными отделениями. Рынок таких систем сравнительно скромен. Повышенная опасность ограничивает интерес к их использованию в Северной Америке и развитых странах Азии. Стандарт 15 ANSI/ASHRAE «Норма безопасности для холодильных систем», лимитирует массу воспламеняющихся хладагентов, которую можно заправить в большие системы. Поэтому изготовители обращают внимание в первую очередь на хладагенты, которые по Стандарту 34 ANSI/ASHRAE отнесены к категории А1 (имеющие низкую токсичность и препятствующие распространению пламени в предписанных условиях), особенно для систем, применяемых в жилых помещениях и в торговле.

Совместимость материалов

При использовании заменителей R-22 необходимы соответствующие смазочные масла. В системах, работавших на R-22, обычно использовались нафтеновые масла с присадками. Хлорфторуглеродные заменители (HFC) требуют особых синтетических масел. Новыми маслами являются полиэфиры (POE) с соответствующей вязкостью, алкилбензолы (AB) и поливинилэфиры (PVE). Широко используемый в передвижных кондиционерах и системах охлаждения на транспорте, работающих на R-134a, полиалкиленгликоль (PAG) не распространен в стационарных системах.

Выбор масла – сложное дело. Пользователи должны строго следовать рекомендациям изготовителей оборудования или производителей компрессоров. Выполнение требования, чтобы влага или другие загрязнители не попадали в систему охлаждения, особенно важно при использовании синтетических масел.

Модернизация и переход с R-22 на другие хладагенты требуют специальных методов удаления старой смазки. Некоторые изготовители хладагентов предлагают альтернативы R-22, подобранные так, чтобы осуществить переход на другой хладагент без замены масла.

Хладагент R-22 легко доступен в настоящее время. Так, видимо, будет и в обозримом будущем. Большинству пользователей поэтому не понадобится менять хладагент R-22 в существующем оборудовании, и даже, может быть, в том оборудовании, которое будут производить в будущем при условии полного отсутствия утечек или их своевременном устранении.

Непросты проблемы, связанные с совместимостью материалов. Специалисты холодильной техники и кондиционирования воздуха осуществили программу исследований, которая называется «Программа исследования совместимости материалов и смазок (MCLR)» для оценки совместимости заменителей R-22 с материалами, используемыми для изготовления холодильных установок. Фирмы-поставщики оборудования вместе с изготовителями хладагентов и масел провели собственные дополнительные исследования материалов для заменителей R-22, и сегодня вопросы совместимости практически решены. Конструкторы лишь должны внимательно выбирать соответствующие материалы.

Аммиак – уникальный заменитель R-22. Однако используемое для R-22 оборудование существенно отличается от аммиачного, так как аммиачные системы изготавливают для несмешивающихся масел. Аммиак совместим с медью, но это исключается в присутствии влаги. Поэтому при изготовлении теплообменников, обмоток электродвигателя и трубопроводов в аммиачных системах обычно не используют сплавы, содержащие медь. Перевод систем с R-22 на аммиак обычно невозможен.

Углеводородные хладагенты совместимы с материалами, используемыми в системах для R-22, при этом могут быть использованы те же или подобные смазочные масла. Однако при замене на углеводороды необходимо внимательно отнестись к проблемам безопасности.

Основные заменители R-22

Основным заменителем R-22 в агрегатированных кондиционерах и тепловых насосах является R-410A. Замену на R-410A нельзя произвести непосредственно. Различия между этими двумя хладагентами существенны и требуют специального подхода. Большинство крупных производителей оборудования уже реализует продукцию, работающую на R-410A, причем самых разнообразных модификаций. Приблизительно 10 % агрегатированной продукции использует R-410A уже сегодня. Вероятно, их доля в Соединенных Штатах превысит 80 % к концу 2007 года и приблизится к 100 % к концу 2009 года.

Хладагент R-410A – наиболее перспективная замена для реконструированных оконных кондиционеров, агрегатированных установок кондиционирования, тепловых насосов геотермального типа или работающих на воде в качестве источника тепла низкого потенциала и малогабаритных чиллеров. Выбор зависит от размера оборудования, особенно в случае кондиционеров, использующих винтовые компрессоры. В кондиционерах средних габаритов наиболее широко используется R-134a, хотя некоторые производители пользуются R-410A и некоторыми другими хладагентами.

Хладагент R-134a применяется при более низких давлениях, а R-410A – при более высоких, поэтому конструктивно холодильное оборудование существенно различается. Изготовители прекратили в большинстве случаев использование R-22 в очень больших чиллерах, которые использовали центробежные компрессоры. Выбирают системы, использующие R-123 и R-134a. В настоящее время

больше предпочитают R-123. Его тоже критикуют с точки зрения воздействия на озон, как и все HCFC, но более поздний срок его запрета, чем R-22, благодаря более низкому ODP дает ему важное преимущество [9; 17; 18].

В табл. 6 приводятся основные заменители R-22 для различных видов и типов оборудования.

Современное производство R-22 в США меньше квоты, выделенной изготовителям. Маловероятно, что в будущем будет существенно не хватать R-22. Дефицита удастся избежать благодаря разрешению производить R-22 для сервиса, имеющимся запасам R-22, существованию альтернативных сервисных смесей и возможности повторного использования уже отработавшего R-22. Любой дефицит в будущем привел бы к повышению цен на R-22, ускорил бы переход к заменителям – альтернативным хладагентам и росту утилизации R-22.

Выводы

Все говорит о том, что переход на заменители R-22 будет планомерным, хотя ни одного однокомпонентного аналогане было определено. В качестве подходящей альтернативы для большинства применений есть большой выбор смесей. Холодильная техника и индустрия кондиционирования разработали оборудование, которое подходит для смены хладагентов и повышает энергоэффективность их использования. Благоприятные результаты и опыт постепенной замены фторхлоруглеводородов (CFC) предполагает, что сокращение использования R-22 будет управляемым и подстегнет разработку новых технологических решений. При вытеснении CFC-хладагентов не ожидается значительного дефицита R-22 для использования в будущем, несмотря на прекращение его производства.

Список литературы

1. UNEP. 1987 with subsequent amendments. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Nairobi, Kenya, United Nations Environment Programme (UNEP), 1987.

2. UNEP. Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer (sixth edition), Nairobi, Kenya, UNEP Ozone Secretariat, 2003.

3. Minor B.H. R410A and R407C design and performance - a literature review// Proc. of the Earth Technologies Forum, Arlington, Va., Alliance for Responsible Atmospheric Policy, 2004.

4. Calm J.M., Hourahan G.C. Refrigerant data summary// Engineered Systems. – 2001. – Vol. 18(11). – P. 74–88.

5. IPCC. Climate Change 2001. The Scientific Basis – Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change of the World Meteorological Organization the United Nations Environment Programme (UNEP)/ Ed. J.T. Houghton et al. – Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 2001.

6. WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, report 47 Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone and Research Project. Nairobi, Kenya, UNEP. Washington, D.C., National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration Office of Earth Science. Brussels, Belgium, European Com-

Таблица 6. Основные заменители R-22 для различных типов оборудования

Группы оборудования	Типичное применение	Основные заменители
Оконные кондиционеры	Бытовые	R-410A
Автономные и сплит-системы кондиционеров и тепловых насосов (воздух – воздух)	Жилые и небольшие общественные здания	R-410A
Автономные кондиционеры, тепловые насосы с грунтовым или водным источником тепла, мультисплиты	Общественные, образовательные здания	R-410A
Мультисплиты	Жилые, общественные, образовательные здания	R-410A, R-407C
Агрегатированные большие чиллеры: с воздушным охлаждением с водяным охлаждением	Общественные, образовательные здания Центральные системы Центральные системы	R-134a, R-410A R-134a, R-410A, R-123 R-123, R-134a
Коммерческие системы охлаждения	Общественные здания	R-134a, R-404A, R-410A, R-507A
Промышленное охлаждение	Промышленные здания	R-134a, аммиак
Транспортное охлаждение	Транспортные средства	R-134a

mission, Research Directorate General. Chaired A-L.N. Ajavon, D.L. Albritton, G. Megie, R.T. Watson, 2003.

7. Yoshida Y. et al. Residential use air conditioner for advanced COP: acceptability of HFC-32/hydrocarbon mixtures// Heat Pumps – a Benefit for the. Environment: Proc. Sixth IEA Heat Pump Conference, Frankfurt am Main, Germany. – VWEW-Verlag, 1999.

8. Domanski P.A. Minimizing throttling losses in the refrigeration cycle// Proc. of International Congress of Refrigeration, International Institute of Refrigeration. – Paris: 1995. – P. 766–773.

9. Calm J.M., Didion D.A. Trade-offs in refrigerant selections: past, present, and future// Refrigerants for the. 21st Century: Proc. ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, Gaithersburg, Md, October 6–7, 1997. – Atlanta: ASHRAE. – 1997 – P. 6–19.

10. Payne W.V., Domanski P.A. A comparison of the R22 and an R410A air conditioner operating at high ambient temperatures// Proc. 9th International Refrigeration Conference at Purdue, West Lafayette, Ind., Purdue University, 2002, paper R2-1.

11. Spatz M.W., Yana Motta S.F. An evaluation of options for replacing HCFC-22 in commercial refrigerating systems// Proc. International Congress of Refrigeration. International Institute of Refrigeration. – Paris: 2003, paper ICR0510.

12. Brown J.S., Kim Y., Domanski P.A. Evaluation of carbon dioxide as R-22 substitute for residential air-conditioning// ASHRAE Transactions. – 2002. – Vol. 108(2).

13. ARI. Standard for Unitary Air-Conditioning and Air Source Heat Pump Equipment (Standard 210/240-2003), Arlington, Va., Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 2003.

14. Domanski P.A., Didion D.A., Chi J.S.W. CYCLE_D: NIST Vapor-Compression Design Program (version 3.0), Standard Reference Database 49, Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology, 2003.

15. ARI. Standard for Water Chilling Packages Using the Vapor-Compression Cycle (Standard 550/590-1998), Arlington, Va., Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 1998.

16. Kul I., DesMarteau D.D., Beyerlein A.L. Coefficient of performance of fluorinated ether and fluorinated ether mixtures// ASHRAE Transactions – 2004 – Vol. 110(2).

17. Calm J.M. Options and outlook for chiller refrigerants// Proc. Earth Technologies Forum, Arlington, Va., Alliance for Responsible Atmospheric Policy, 2000. – P. 239–248.

18. UNEP. Report of the Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee – 2002, Assessment, United Nations Environment Programme (UNEP), Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya, 2003.