



ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ХЛАДАГЕНТА ДЛЯ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Одно из самых первых решений, которое требуется принять при проектировании и разработке новой серии холодильного оборудования, - выбор наиболее эффективного для данного типа машин хладагента, учитывая его термодинамические характеристики (удельную хладопроизводительность, рабочее давление и температуру в системе, холодильный

коэффициент), безопасность (экологичность, негорючесть, нетоксичность), стоимость и эксплуатационные затраты.

По химическому составу все хладагенты можно классифицировать следующим образом:

Химическая группа		Аббревиатура	Примеры
Хлорфторуглероды		ХФУ (СFC)	R 11, R 12
Хлорфторуглеводороды		ГХФУ (HCFC)	R 22
Фторуглеводороды		ГФУ (HFC)	R 134a, R 407C, R 410A
Природные хладагенты	Углеводороды	ГУ (HC)	R 600 - бутан, R 290 - пропан
	Неорганические соединения		R 717 - аммиак, R 718 – вода

Как известно, в соответствии с корректировками Монреальского Протокола (1987 г.) по веществам, разрушающим озоновый слой Земли, производство хлорфторуглеводородов (ГХФУ), к группе которых относится широко применявшийся в течение многих лет хладагент R 22, предусмотрено заморозить, а к 1 января 2030 г. и полностью прекратить. Во многих странах Европы (Швеция, Германия, Италия и др.) положения национального законодательства являются еще более жесткими. В этих странах использование ГХФУ в новом холодильном оборудовании запрещено уже с 2002 г.

В настоящее время в качестве альтернативных, не содержащих хлора заменителей хладагента R 22 можно рассматривать такие фторуглеводороды, как R 407C, R 134a, R 410A, R 404A. Строго соблюдая общемировую тенденцию отказа от применения озоноразрушающих веществ, компания McQuay International провела целый ряд научно-практических исследований, целью которых являлось определение наиболее эффективного варианта оборудования при использовании того или иного типа хладагента.

Хладагент R 407 C является наиболее простым и дешевым заменителем R 22 с похожими термодинамическими характеристиками, отвечающими за хладопроизводительность компрессора, а, следовательно, и всего агрегата. Хладагент R 134a требует специальных конструктивных доработок компрессора, что в результате приводит к увеличению стоимости машины. Однако R 134a характеризуется очень высокой холодильной эффективностью, низкими значениями рабочего давления, самым низким из всех вышеперечисленных фторуглеводородов потенциалом глобального потепления и другими преимуществами.

Учитывая, что поршневые компрессоры по целому ряду причин вытесняются спиральными и винтовыми машинами, McQuay International сконцентрировал особые усилия на развитии холодильных установок, оснащенных именно этими компрессорами. Результаты эксплуатации чиллеров

McQuay показали, что если для спиральных машин наиболее целесообразным является использование хладагента R 407C, то для винтовых – R 134a, и эта тенденция четко прослеживается сейчас в широчайшем ассортименте охладителей жидкости, предлагаемых фирмой. Поскольку McQuay International является производителем одновинтовых компрессоров, у фирмы имеется возможность гибкой оптимизации конструкции компрессора под определенный тип хладагента для обеспечения его наилучших эксплуатационных характеристик. Это позволяет заказчику выбирать наиболее подходящий для него хладагент, исходя из требований конкретной страны и конкретного объекта.

Тем не менее, McQuay International безусловно отдает предпочтение хладагенту R 134a, считая его самым эффективным на данный момент рабочим веществом, которое может использоваться в одновинтовом компрессоре. Причины такого выбора рассматриваются ниже.

Для некоторых областей применения McQuay International предполагает отвести заметное место хладагенту R 410A (в качестве промежуточного варианта фирма уже представляла чиллеры с винтовым компрессором Frame 2, адаптированным к этому хладагенту), но так как для эксплуатации R 410A характерны очень высокие давления, низкая критическая температура и высокая объемная хладопроизводительность, он используется только в специально разработанных новых агрегатах (см. раздел Технического бюллетеня “Новая продукция McQuay International”).

После принятия Киотского протокола (1997 г.) наметилось более широкое применение природных хладагентов. В частности, McQuay International планирует в ближайшем будущем использовать в своем оборудовании аммиак, поскольку несмотря на его токсичность он не оказывает отрицательного воздействия на озоновый слой Земли и имеет нулевой потенциал глобального потепления.

Свойства хладагентов, используемых фирмой McQuay International на настоящий момент и планируемых для использования

	HCFC 22	HFC 407C	HFC 134a	HFC 410A	R 717
Состав	Чистое вещество R 22 (дифторхлорметан)	Неазеотропная смесь: 23% R 32, 25% R 125, 52% R 134a	Чистое вещество R 134a (тетрафторэтан)	Неазеотропная смесь: 50% R 32, 50% R 125	Чистое вещество NH ₃ (аммиак)
Удельная массовая хладопроизводительность, кДж/кг	163,79	Практически такая же, как у R 22 162,28	Ниже, чем у R 22 и R 407C 149,95	Высокая 167,86	Очень высокая 1102,2
Холодильный коэффициент	Высокий 4,65	Средний 4,51	Высокий 4,60	Низкий 4,41	Очень высокий 4,84
Рабочее давление	Высокое	Среднее	Низкое	Очень высокое	Высокое
Температура нагнетания	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая	Очень высокая
Температурное скольжение	Отсутствует	Высокое - 5 °K	Отсутствует	Очень низкое - 0,2 °K	Отсутствует
Потенциал истощения озонового слоя Земли (ODP)	0.050	0	0	0	0
Потенциал глобального потепления (GWP)	1700	1980	1300	2340	0
Классификация безопасности по ASHRAE *)	A1	A1	A1	A1	B2
Область применения в чиллерах производства McQuay	Чиллеры (только на экспорт за пределами ЕС) с водяным и воздушным охлаждением конденсатора, спиральным и поршневым компрессором	Чиллеры с воздушным и водяным охлаждением конденсатора, спиральным (для машин малой мощности) и поршневым компрессором	Чиллеры средней и большой мощности с воздушным и водяным охлаждением конденсатора и винтовым компрессором	Чиллеры большой мощности с водяным охлаждением конденсатора и винтовым компрессором	Планируемое производство чиллеров с водяным и воздушным охлаждением конденсатора

*) A = не токсичный (при концентрации менее 400 мг/кг)
 B = токсичный (при концентрации менее 400 мг/кг)
 1 = не пожароопасный
 2 = пожароопасный

При условиях: температура испарения = 258 К (-15,6 °C), температура конденсации = 303 К (29,8 °C), перегрев и переохлаждение = 0 К.

Сравнение свойств хладагентов

1. Химический состав хладагентов

Хладагенты R 407C и R 134a

Оба хладагента принадлежат к группе фторуглеводородов (HFC), т.е. не содержат хлора, разрушающего озоновый слой Земли.

Однако R 134a является чистым однородным веществом (тетрафторэтан – CF₂HCF₃), а R 407C – неазеотропной смесью трех фторуглеводородов (см. таблицу), т.е. смесью, в которой каждое из веществ обладает своими собственными свойствами.

R 407C

Хладагенты	R 32 (дифторметан CF ₂ H ₂)	R 125 (пентафторэтан CF ₂ HCF ₃)	R 134a (тетрафторэтан CF ₂ HCF ₃)
Процентное содержание	23 %	25 %	52 %

Недостатки системы при использовании R 407C как неазеотропной смеси:

1. Каждый из компонентов неазеотропной смеси имеет разные термодинамические параметры испарения и конденсации, вследствие чего свойства хладагента при переходе из одного фазового состояния в другое (испарении или конденсации) постоянно изменяются. В состоянии термодинамического равновесия пар и жидкость имеют различный состав, первым начинает испаряться более летучий компонент, что изменяет характеристики остающейся смеси.

2. Температурное скольжение (глайд), т.е. возрастание температуры в процессе кипения составляет у R 407C около 5K, что является значительной величиной. Как следствие, для обеспечения эффективного холодильного цикла и надежной работы компрессора требуется более тщательный контроль перегрева и переохлаждения и использование противоточного теплообменника испарителя.

3. Поскольку все три составляющих хладагента R 407C имеют различную степень летучести, то при утечках хладагента теряются в первую очередь самые летучие компоненты, поэтому дозаправку системы выполнять нельзя, т.к. оставшееся в холодильном контуре рабочее вещество по составу уже

Что такое температурное скольжение?

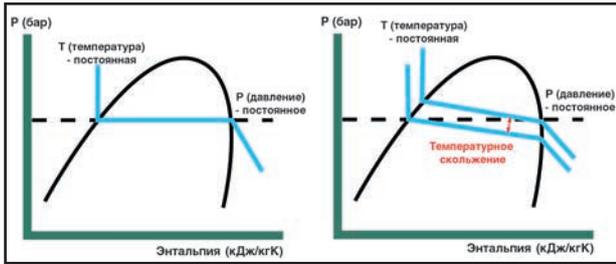


Рис.1. Диаграммы P-I состояния рабочего вещества

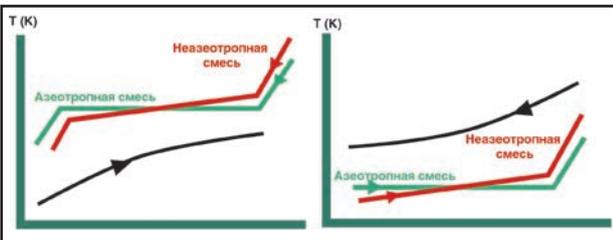


Рис.2. Изменение температуры хладагента (для азеотропных и неазеотропных смесей) при конденсации и испарении

не будет являться хладагентом R 407C. Вследствие этого при потерях хладагента требуется вакуумирование системы и ее полная перезаправка. Учитывая, что стоимость R 407C в 6 раз выше, чем R 22, данная процедура довольно дорогостоящая.

4. Чтобы обеспечить исходное процентное содержание компонентов неазеотропной смеси, для перезаправки системы необходимо использовать только жидкий хладагент. Операция перезаправки требует привлечения квалифицированных специалистов.

Преимущества при использовании хладагента R 134a:

1. Отсутствие температурного скольжения, т.е. фазовые переходы (испарение и конденсация) протекают при постоянной температуре.
2. Стабильное поддержание требуемых параметров перегрева и переохлаждения.
3. Возможность дозаправки холодильного контура при утечках хладагента.
4. Возможность заправки системы как газообразным, так и жидким хладагентом.

Хладагент R 410A

Хладагенты	R 32 (дифторметан CF ₂ H ₂)	R 125 (пентафторэтан CF ₂ HCF ₃)
Процентное содержание	50 %	50 %

Фторуглеводород R 410A также является неазеотропной смесью, но температурным скольжением для него можно пренебречь, поскольку оно очень незначительно (0.2K).

2. Рабочее давление хладагентов

На нижеприведенных диаграммах показаны значения давления конденсации (нагнетания) и разность давлений между сторонами нагнетания и всасывания для хладагентов R 134a, R 407C и R 410A при следующих условиях:

- Температура конденсации насыщенного пара: 303 K;
- Температура испарения насыщенного пара: 258 K.
- Перегрев и переохлаждение: 0 K

Как видно из нижеприведенных диаграмм, для указанных хладагентов характерны следующие рабочие условия:

R 134a :

- ✓ Очень низкие значения абсолютных рабочих давлений.
- ✓ Намного более низкий дифференциал рабочих давлений, чем у R 407C и R 410A.

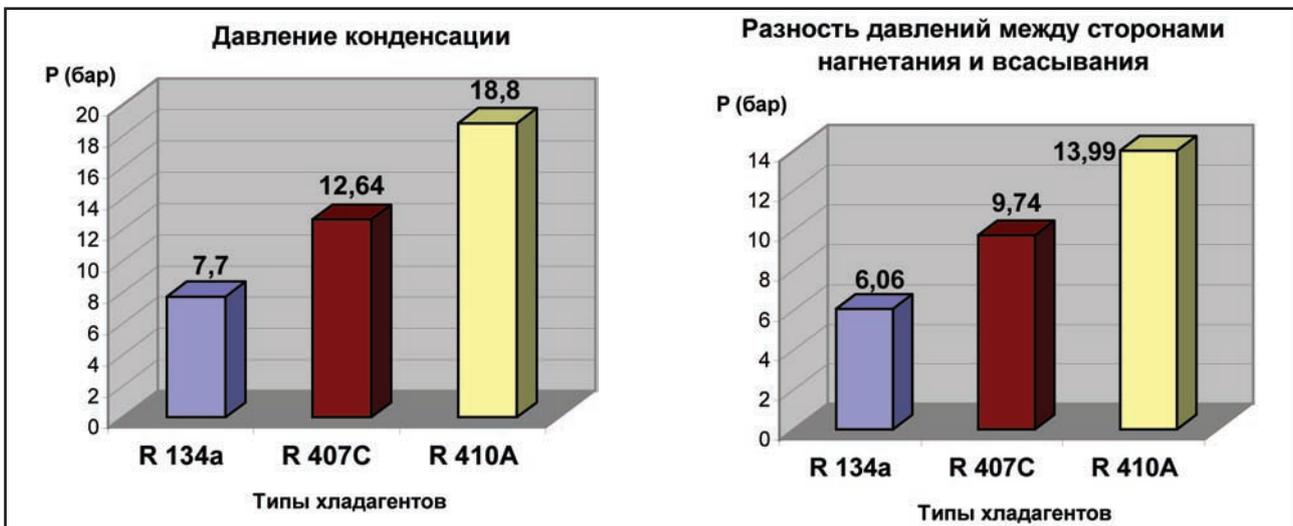
R 407C:

- ✓ Высокие значения абсолютных рабочих давлений и их дифференциала.

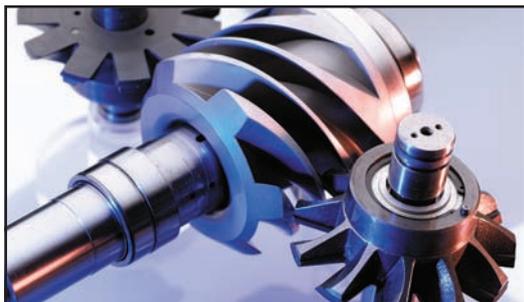
R 410A:

- ✓ Чрезвычайно высокие значения рабочих давлений и их дифференциала.

Абсолютные рабочие давления и их разность определяют надежность и эффективность холодильной машины. Как показали результаты испытаний, эти показатели особенно принципиальны для эксплуатационных качеств агрегатов с винтовыми компрессорами.



Меньше рабочее давление - выше надёжность агрегата



Величина нагрузок, приходящихся на компрессор и его подшипники, определяется непосредственно абсолютными величинами давления нагнетания и всасывания, необходимых для данного хладагента. Вследствие этого, чем выше абсолютные значения рабочего давления, тем больше нагрузка, воспринимаемая компрессором, и сила трения, испытываемая подшипниками, а, следовательно, и их износ, что характеризует надежность компрессора и всего агрегата. Кроме того, увеличение нагрузки при равной производительности приводит к необходимости большего потребления электроэнергии, а, значит, снижению энергетической эффективности холодильной машины.

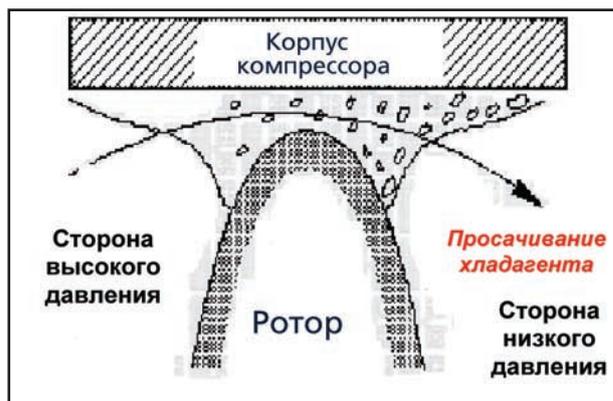
Меньше разность рабочих давлений - выше эффективность

Между корпусом компрессора и верхом зубьев основного ротора компрессора всегда существует минимальный зазор, необходимый для беспрепятственного вращения винта. В то же время этот зазор является нежелательным, т.к. через него хладагент просачивается со стороны высокого на сторону низкого давления. При этом, чем выше разность этих давлений, тем существеннее протечки хладагента, и, как результат, – потеря эффективности компрессора.

При фиксированном давлении всасывания и нагнетания потери изоэнтальпической эффективности в результате протечек хладагента со стороны высокого на сторону низкого давления в компрессоре составят для R 134a - 6-8%, для R 407C - 10-12%, для R 410A – 14-16%.

Следовательно, использование хладагента R 134a в винтовых холодильных машинах является более целесообразным, чем других хладагентов, с точки зрения износостойкости компрессора, а также потерь эффективности в результате перетекания хладагента со стороны высокого на сторону низкого давления.

Тем не менее, следует отметить, что конструкция одновинтовых компрессоров фирмы McQuay International такова, что они успешно могут работать на хладагентах, имеющих высокое

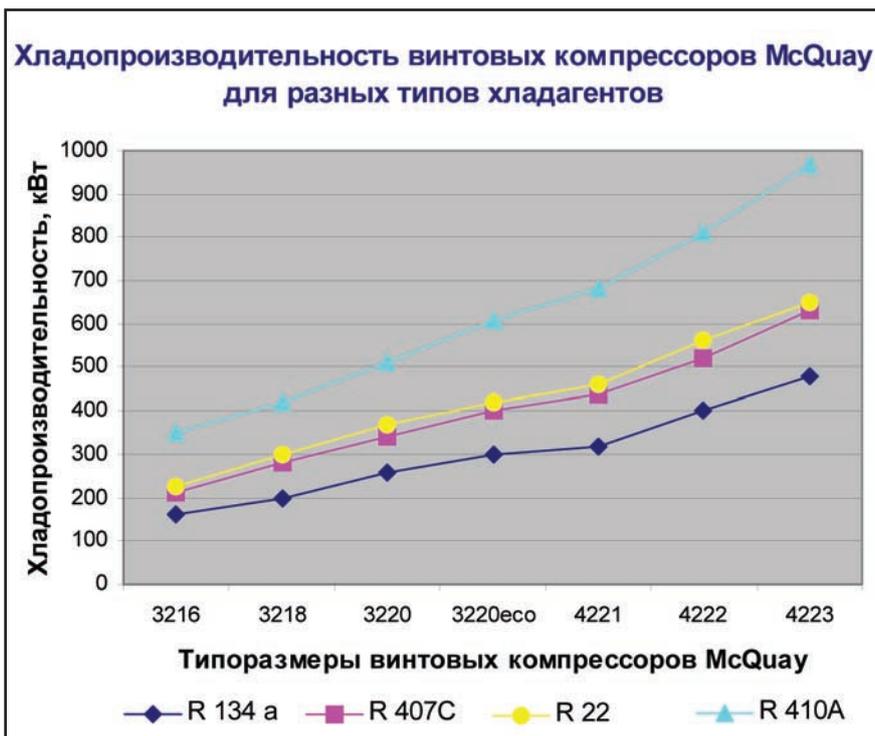


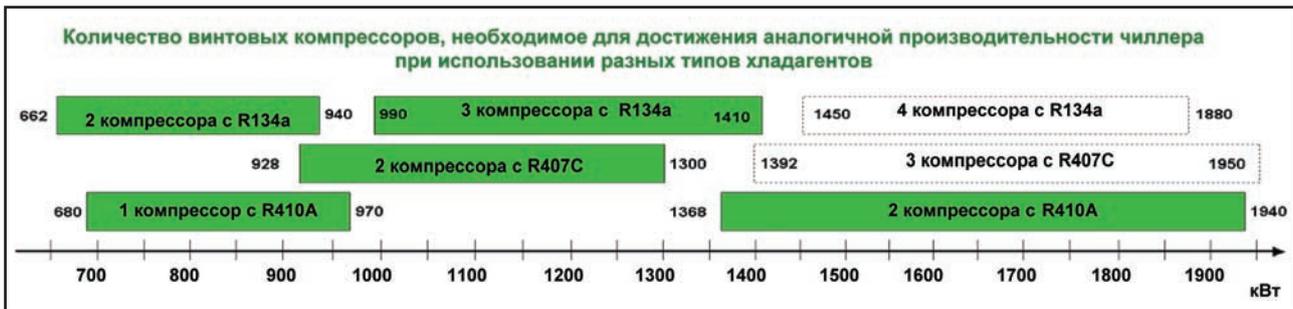
рабочее давление. Этому способствуют такие преимущества одновинтовых компрессоров, как сбалансированность действующих нагрузок, отсутствие размерных ограничений для установки подшипников, практически нулевой зазор между поверхностями основного и затворного роторов, а также между основным ротором и корпусом компрессора.

3. Удельная хладопроизводительность

Если сравнивать удельную объемную или массовую хладопроизводительность холодильного агента (разность удельных энтальпий хладагента на входе в компрессор и на входе в испаритель), то хладагент R 134a здесь уступает R 407C и особенно R 410 A. Поэтому хладопроизводительность одного и того же компрессора при использовании разных хладагентов будет самой низкой для R 134a, что показано на нижеприведенном графике.

Кроме того, чем выше удельная объемная хладопроизводительность хладагента (кВт/м³), тем меньшее количество компрессоров необходимо использовать в чиллере для достижения определенной мощности, а от этого зависит стоимость и компактность агрегата. С точки зрения указанных факторов лидирующие позиции занимает хладагент R 410A, а R 134a существенно проигрывает и R 410A и R 407C (см. диаграмму ниже).





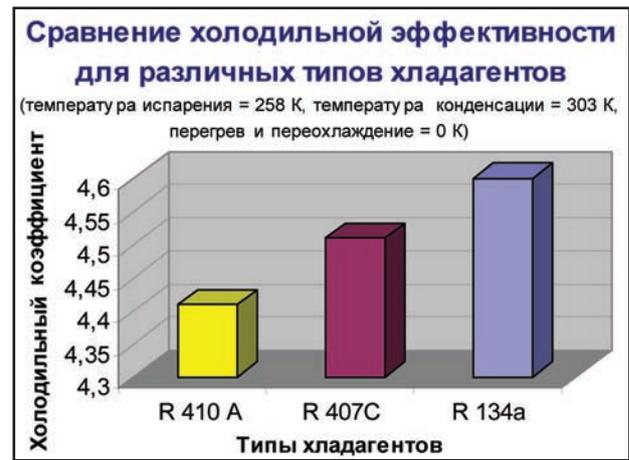
Учитывая данное обстоятельство, фирма McQuay International, несмотря на преобладающее количество достоинств хладагента R 134a, приступила с 2004 г. к выпуску новых серий чиллеров с винтовым компрессором, работающих на хладагентах R 407C

и R 410A и являющихся альтернативными вариантами машин с хладагентом R 134a (см. раздел Технического бюллетеня "Новая продукция McQuay International").

4. Эффективность холодильного цикла

Несмотря на то, что удельная холодопроизводительность рабочего вещества ПКХМ является весьма важной термодинамической характеристикой хладагента, тем не менее, эффективность холодильной машины с точки зрения производства холода оценивается холодильным коэффициентом, представляющим собой отношение количества тепла, отнятого от охлаждаемой среды, к теплоте, эквивалентной затраченной работе на сжатие.

Сравнение холодильных коэффициентов рассматриваемых хладагентов (R 134a, R 407C, R 410A) показывает, что R 134a имеет неоспоримое первенство (см. диаграмму).



При стандартных условиях эксплуатации чиллеров с воздушным конденсатором и винтовым компрессором термодинамические параметры холодильных циклов хладагентов R 134a и R 407C выражаются следующим образом:

Условия:

- ✓ Температура наружного воздуха: 35 °C
- ✓ Температура охлаждаемой воды: 12/7 °C
- ✓ Температура конденсации: 55 °C
- ✓ Температура испарения: 3 °C
- ✓ Перегрев и переохлаждение хладагента: 10 °C

ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЦИКЛ ДЛЯ R134a
R 134a (удельные массовые значения)
 Энтальпия на выходе из испарителя: 413 кДж/кг
 Энтальпия в конце процесса сжатия: 445 кДж/кг
 Энтальпия на входе в испаритель: 265 кДж/кг
 Полезная энергия: 413 – 265 = 148 кДж/кг
 Энергия, затрачиваемая на сжатие:
 445 – 413 = 32 кДж/кг
ХОЛОДИЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ:
 COP (134a) = 148 / 32 = 4.62

ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЦИКЛ ДЛЯ R 407C
R 407C (удельные массовые значения)
 Энтальпия на выходе из испарителя: 425 кДж/кг
 Энтальпия в конце процесса сжатия: 465 кДж/кг
 Энтальпия на входе в испаритель: 272 кДж/кг
 Полезная энергия: 425 – 272 = 153 кДж/кг
 Энергия, затрачиваемая на сжатие:
 465 – 425 = 40 кДж/кг
ХОЛОДИЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ:
 COP (407C) = 153 / 40 = 3.82

Очевидно, что при стандартных для работы чиллера условиях холодильный коэффициент хладагента R 134a намного выше, чем R 407C.

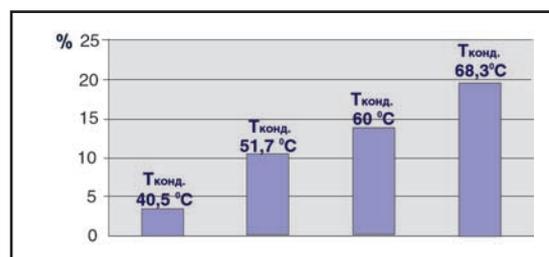
Таким образом, одним из важнейших преимуществ хладагента R 134a является его высочайшая холодильная эффективность.

5. Суммарная энергетическая эффективность холодильной машины

Учитывая, что Советом стран ЕС активно проводится политика стимулирования мер по увеличению энергетической эффективности внедряемых технологий и оборудования, разработка экономичных с точки зрения энергопотребления установок является на сегодняшний день одной из самых актуальных задач, стоящих перед производителем. С каждым годом вопросу энергоэффективности уделяется все большее внимание и в России. Указом президента РФ энергосбережение введено в ранг государственной политики, что способствует сосредоточению особого внимания на энергетических характеристиках оборудования. В этой связи хладагент R 134a можно считать наиболее прогрессивным из предлагаемых на рынке климатической техники альтернативных хладагентов благодаря высочайшему холодильному коэффициенту, минимальным нагрузкам на компрессор и очень незначительным потерям эффективности при перетекании хладагента со стороны высокого на сторону низкого давления.

Выигрыш в суммарной энергетической эффективности чиллера

при использовании хладагента R 134a вместо R 407C для различных значений температуры конденсации представлен ниже следующей диаграммой:



Как видно из диаграммы, в случае использования хладагента R 134a энергоэффективность чиллера при стандартных условиях его эксплуатации будет на 10 - 15 % выше, чем в случае использования хладагента R 407C.

6. Экологические показатели

Согласно Киотскому протоколу все альтернативные хладагенты не могут считаться безопасными для климата Земли соединениями, т.к. относятся к парниковым газам, способствующим повышению температуры воздуха в тропосфере, а, следовательно, усилению парникового эффекта и глобальному потеплению климата.

В нижеприведенной таблице даны потенциалы глобального потепления (ПГП или GWP) хладагентов относительно потенциала двуокиси углерода, принятого за единицу.

R 22	R 134a	R 407 C	R 410A
1700	1300	1980	2340

Как видно из таблицы, хладагент R 134a имеет самый низкий ПГП среди указанных хладагентов, а, следовательно, его отрицательное влияние на климат земли является наименьшим.

Хотя ПГП является важным показателем экологической безопасности, но наряду с ним на глобальное потепление влияет энергоэффективность машин и аппаратов, используемых при производстве искусственного холода. Для суммарного учета парникового эффекта введен общий

коэффициент эквивалентного потепления (ОКЭП или TEWI), состоящий из двух слагаемых:

$$\text{ОКЭП} = \text{ПГП} \times \text{M} + \alpha \times \text{V} \times \text{L}, \text{ где}$$

ПГП = потенциал глобального потепления;

M = эмиссия хладагента в атмосферу Земли, кг;

α = масса двуокиси углерода (CO_2), выделяемого за счет сгорания топлива при производстве 1 кВт·час электроэнергии (около 0,5);

V = потребление электроэнергии холодильной системой, кВт

L = продолжительность функционирования холодильной системы.

Второе слагаемое (косвенный фактор глобального потепления) ОКЭП в большинстве случаев оказывается преобладающим. Следовательно, чем ниже энергопотребление холодильной установки, тем меньше отрицательное влияние ее эксплуатации на климат Земли. Как было отмечено ранее, чиллеры с хладагентом R 134a характеризуются очень высокой энергетической эффективностью, поэтому R 134a можно считать наиболее экологичным из рассмотренных фторуглеводородов.

8. Выводы

Вышеперечисленные достоинства хладагента R 134a, а именно: минимальное отрицательное влияние на климат Земли, высокая энергетическая эффективность, низкое рабочее давление в системе, отсутствие температурного скольжения, возможность дозаправки холодильного контура, определяют выбор фирмой McQuay International данного хладагента для своих охладителей жидкости, оснащенных винтовым компрессором собственного производства.

Однако, принимая во внимание разнообразие требований и возможностей при использовании оборудования с тем или иным типом хладагента, McQuay International начала выпуск сходных агрегатов, работающих на различных типах хладагентов и потому отличающихся по стоимости и эффективности (см. раздел Технического бюллетеня "Новая продукция McQuay International").