

УДК621.56

## Замена хладагента R22 на альтернативный в регионах с высокой температурой окружающей среды

Канд. техн. наук А. П. ЦОЙ, А. С. ФИЛАТОВ, Д. А. ЦОЙ

Алматинский технологический университет

Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Толе би, 100

*The refrigerant R22 as a result of its influence on the ozone layer of the earth (ODP = 0,05) cannot be used in the long-term perspective in accordance with the government regulation of the turnover of ozone depleters and goods containing them. Based on the research performed the most appropriate substitutes for R22 are Refrigerants: R404A, R407, R507 and R134a.*

*Reviewed refrigerants R404A, R407B, R507 used on the refrigerating machines operating on the condensation temperature of  $t_{c.c} = 650^{\circ}\text{C}$  have the condensing pressure higher than of refrigerant R22 for approximately 19 %. Therefore in the given temperature it is recommended to use refrigerant R134a, which has the 30 % lower condensation pressure than R22.*

**Keywords:** ozone depletion potential (ODP), ozone depleters, hydrofluorocarbon, haloid free, chlorine free (HFC).

**Ключевые слова:** потенциал озонобезопасности (ODP), озоноразрушающие вещества, гидрохлорфторуглероды, безгалогидные, хлорнесодержащие (HFC).

В настоящее время хладагент R22 является одним из основных хладагентов, используемых в холодильных системах. Однако данный хладагент ввиду его влияния на озоновый слой Земли (потенциал озонобезопасности  $\text{ODP} = 0,05$ ) не может быть использован в долгосрочной перспективе в соответствии с государственным регулированием оборота озоноразрушающих веществ и содержащей их продукции [1, 2].

В данной статье представлен структурный обзор, а также анализ основных преимуществ однокомпонентных и смесевых хладагентов с ODP, равным нулю, которые являются альтернативой R22 в регионах с высокой температурой окружающей среды (рис. 1). Также принимается во внимание потенциал воздействия на глобальное потепление

(GWP), определяющий суммарное эквивалентное воздействие на потепление — TEWI (total equivalent warming impact).

Согласно стандарту 34–1997 ASHRAE «Классификация по группам безопасности», введены две категории хладагентов по токсичности (А, В) и три группы пожарной безопасности в каждой из этих категорий. Первую группу в каждой категории составляют негорючие хладагенты (А), вторую — хладагенты с «умеренной» воспламеняемостью (А2), третью — высокогорючие хладагенты (А3). Токсичным хладагентом считают индекс В1. Для смесевых хладагентов вводится двойная индексация. Первый индекс дается для смеси исходного состава, второй индекс означает оценку безопасности для худшей ситуации при фракционировании



Рис. 1. Классификатор однокомпонентных и смесевых хладагентов с  $\text{ODP} = 0$

смеси. Наличие у смеси индекса безопасности, к примеру A1/A2, означает, что возможна ситуация, когда воспламенение смеси становится реальным.

**Хладагент R161.** По термодинамическим параметрам хладагент R161 подобен R22, но является озонобезопасным ( $ODP = 0$ ) и имеет низкий потенциал глобального потепления ( $GWP = 12$ ). Однако данный хладагент является легковоспламеняющимся (категория A2).

**Хладагент R152a.** Указанный хладагент уже в течение некоторого времени рассматривается как альтернативная замена R134a в автомобильных кондиционерах воздуха.

Однако хладагент R152a легко воспламеняется из-за низкого содержания фтора и классифицируется по категории опасности A2. Недостатком в случае более высокой степени сжатия является сравнительно высокая температура нагнетания в компрессоре, лежащая между уровнями температур для R134a и R22, известного своей высокой тепловой нагрузкой (рис. 2) [3].

**Хладагенты R32, R143a, R125.** Данные хладагенты также относятся к хлорнесодержащим ( $ODP = 0$ ) альтернативным. Хлорнесодержащий (HFC) хладагент R32 первоначально рассматривался как альтернатива для R22.

Главным преимуществом R32 является чрезвычайно низкий потенциал воздействия на глобальное потепление ( $GWP = 650$ ). Хладагенты R32 и R143a относятся к легко воспламеняющимся (категория опасности A2), следовательно, не могут являться прямыми заменителями R22. Кроме того, R32 характеризуется весьма высокими уровнями давления конденсации (рис. 3) [3].

Хладагент R125 является невоспламеняющимся, температура его кипения составляет минус 48,5 °C, а показатель адиабаты сравнительно низок. Недостатками R125 являются крутая кривая давления конденсации (рис. 3), требующая более высокой степени сжатия, и весьма низкая критическая температура, равная 66 °C. В связи с этим, область его применения в установках с конденсаторами воздушного охлаждения ограничена, а эф-

фективность охлаждения при высоких температурах конденсации относительно невелика.

**Хладагенты R600a, R170.** Пропан предлагается в виде смеси с изобутаном (R600a) или этаном (R170), поэтому эти хладагенты являются легко воспламеняющимися.

**Хладагент R1270.** Пропилен «высокогорючий» R1270 относится к группе A3 по пожароопасности; имеет место частичное ограничение применения ввиду более высокой температуры нагнетания.

**Хладагент R290.** В качестве хладагента-заменителя может использоваться также и R290 (пропан), представляющий собой органическое вещество (углеводород). Данный хладагент не обладает озоноразрушающим потенциалом, а также каким-либо существенным прямым воздействием на глобальное потепление.

Уровни давлений конденсаций аналогичны R22 (рис. 4) [4].

Ввиду весьма благоприятной характеристики давления конденсации вплоть до температур испарения около минус 40 °C в установках с R290 могут применяться одноступенчатые компрессоры.

Недостатком углеводородов является высокая горючесть, поэтому они отнесены к категории опасности A3. Так как для установки, работающей на R290, требуется принятие мер пожаровзрывобез-

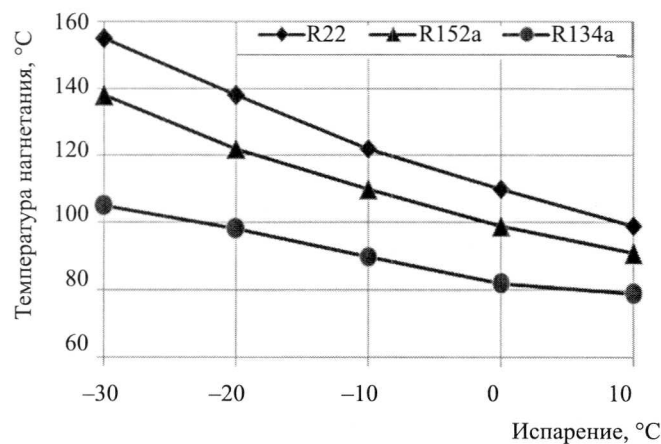


Рис. 2. Сравнение температур нагнетания в компрессоре для хладагентов R22, R152a, R134a

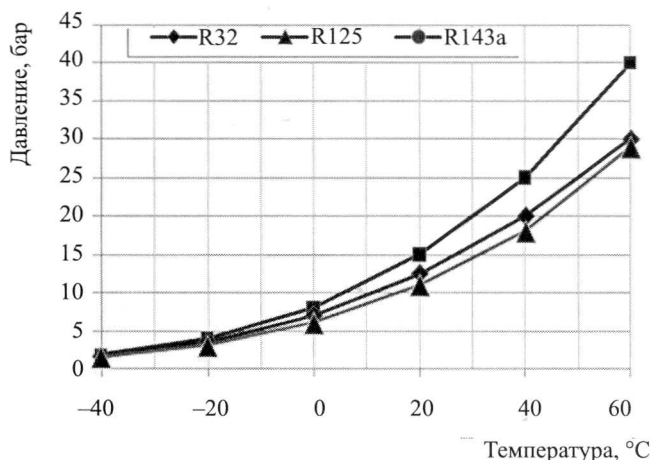


Рис. 3. Сравнение уровней давления конденсации для хладагентов R32, R125, R143a

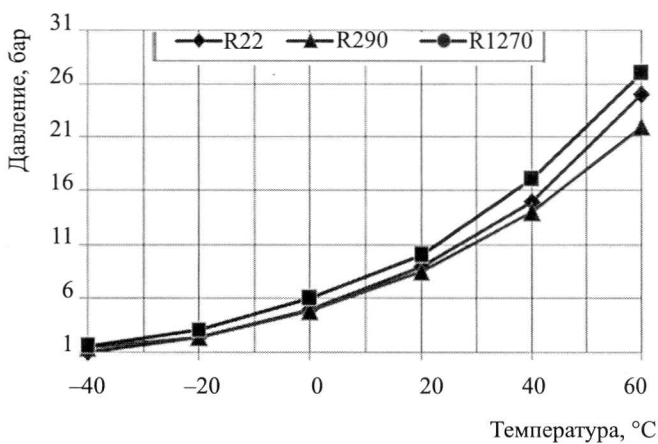


Рис. 4. Сравнение уровней давления конденсации для хладагентов R22, R290, R1270

опасности, перевод существующих установок целесообразен лишь в исключительных случаях.

**Хладагент R723.** Данный хладагент является токсичным и легко воспламеняющимся. Относится к группе опасности B2 и имеет по сравнению с R22 высокую температуру нагнетания (рис. 5) [3].

**Хладагент R717.** Недостатком R717 ( $\text{NH}_3$ ) является высокий адиабатический показатель ( $\text{NH}_3 = 1,31$ ;  $\text{R22} = 1,18$ ), что отражается на температуре нагнетания, которая существенно выше, чем у R22 (рис. 6). Аммиак является токсичным и относится к группе B2, поэтому в связи с легкой воспламеняемостью и токсичностью по категориям A2, A3, B2 применение хладагентов R32, R161, R143a, R152, R600a, R170, R1270, R290, R723, R717 требует специального рассмотрения.

**Хладагент R419A.** Данный хладагент является смесью базовых компонентов R125 и R134a с более высоким содержанием R125 и диметилэфиром (R-E170) в качестве третьего компонента вместо бутана. Следует принять во внимание критерии, описанные для R125 ранее. Аналогичны также и термодинамические свойства с вытекающими из них следствиями.

**Хладагент R410A.** Данный хладагент представляет собой азеотропную смесь ( $\text{GWP} = 1720$ ). Существенной особенностью является удельная холодопроизводительность, которая почти на 50 % выше, чем у R22, однако происходит пропорциональное повышение рабочих давлений в системе (см. рис. 6) [4]. Ввиду незначительного температурного скольжения ( $< 0,2 \text{ K}$ ) практичность применения смеси представляется аналогичной однокомпонентным хладагентам. Однако следует учитывать уровни давления конденсации и более высокую удельную нагрузку на узлы системы.

Высокие уровни давления конденсации для R410A требуют внесения коренных изменений в конструкции компрессора, теплообменников, органов управления, трубок и шлангов наряду с обращением особого внимания на общие правила безопасности, регламентирующие качество и размеры шлангов и гибких элементов (для температуры конденсации около  $60^\circ\text{C}$ , давление 38 бар).

Другим критерием является сравнительно низкая критическая температура, равная  $73^\circ\text{C}$ . Тем самым, независимо от конструкции узлов на стороне высокого давления, существенно ограничивается температура конденсации.

**Хладагент R744 ( $\text{CO}_2$ ).** Данный хладагент стал менее популярен и практически исчез с рынка. Основными причинами являются относительно неблагоприятные для обычных применений в холодильной технике и установках кондиционирования термодинамические характеристики. Давление нагнетания  $\text{CO}_2$  чрезвычайно высокое, а критическая температура, равная  $31^\circ\text{C}$  при давлении 74 бар, — слишком низкая.

**Хладагенты R404A, R507.** Смесевые хладагенты R404A, R507A являются хлорнесодержащими ( $\text{ODP} = 0$ ) и поэтому долгосрочными альтернати-

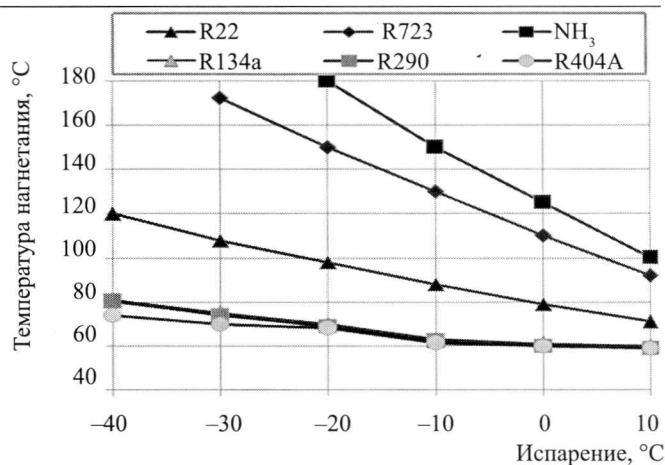


Рис. 5. Сравнение температур нагнетания хладагентов

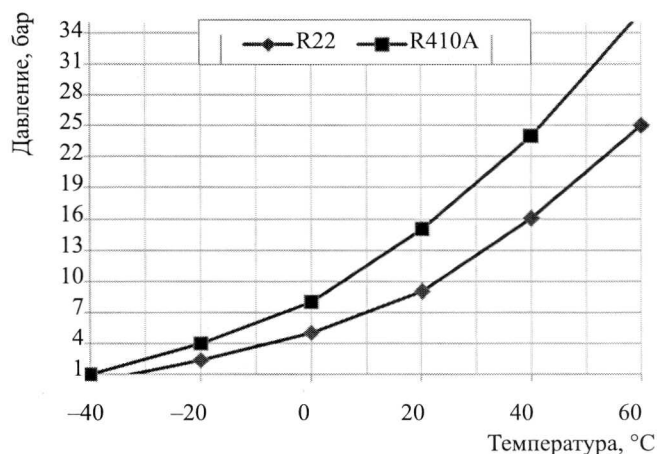


Рис. 6. Сравнение уровней давления конденсации хладагентов

вами R22. Особенностью всех трех ингредиентов (R143a, R125, R134a) признан чрезвычайно низкий показатель адиабатического сжатия, что выражается низкой температурой нагнетания. Поэтому эффективность применения одноступенчатых компрессоров при низких температурах испарения гарантирована.

Благодаря одинаковым точкам кипения R143a и R125 и относительно малому содержанию R134a температурное скольжение трехкомпонентной смеси R404A в значимых областях применения меньше одного градуса Кельвина. Поэтому поведение этой смеси в теплообменниках мало отличается от поведения азеотропов.

**Хладагент R507A.** Данный хладагент — двухкомпонентное сочетание, обнаруживающее азеотропное поведение в сравнительно широком диапазоне. Некоторое препятствие представляет относительно высокий потенциал воздействия на глобальное потепление ( $\text{GWP} = 3260 \dots 3300$ ), определяемый главным образом наличием R143a и R125.

**Хладагенты R407A, R407B.** В качестве альтернативы ранее описанным заменителям были разработаны дополнительные разновидности смесей на основе R32, которые не содержат хлора ( $\text{ODP} = 0$ ). Важным фактором является значительное температурное скольжение ( $2\text{--}3 \text{ K}$ ), которое может отрицательно влиять на производительность и разность температур испарения и конденсации.

**Хладагент R407C.** Смеси фторуглеродов R32, R125 и R134a наиболее предпочтительны для краткосрочной замены R22, так как их производительность и эффективность весьма схожи.

Недостатком при обычном применении является высокое температурное скольжение, что требует соответствующего проектирования систем и может отрицательно влиять на эффективность теплообменников.

**Хладагент R134a.** Данный хладагент является первым всесторонне проверенным хлорнесодержащим (HFC) хладагентом с  $ODP = 0$  и  $GWP = 1300$ . В настоящее время он успешно используется во многих холодильных установках и системах кондиционирования в чистом виде, а также в качестве компонентов множества смесей.

Всесторонние испытания показали, что производительность R134a превышает теоретические прогнозы в широком диапазоне режимов работы компрессоров. Уровни температур нагнетания и масла существенно ниже, чем у R22, поэтому широк спектр его применения в системах кондиционирования и среднетемпературных холодильных установках. Для экономической эффективности применения благоприятствуют хорошие показатели теплопередачи в испарителях и конденсаторах в отличие от зеотропных смесей, например R407C, используемых в настоящее время как заменитель.

В регионах с высокой температурой окружающей среды предпочтительнее заменять R22 на R134a ( $t_{кр} = 101,1^\circ\text{C}$ ), так как диапазон применения R22 в подобных установках ограничен высоким уровнем давления конденсации (рис. 7) [4].

Однако более низкая удельная объемная холодопроизводительность R134a требует применения компрессора большей объемной производительности, чем при применении R22. Необходимо также принимать во внимание ограничения, имеющие место в установках с низкой температурой испарения.

Как уже показал опыт, R134a хорошо под-

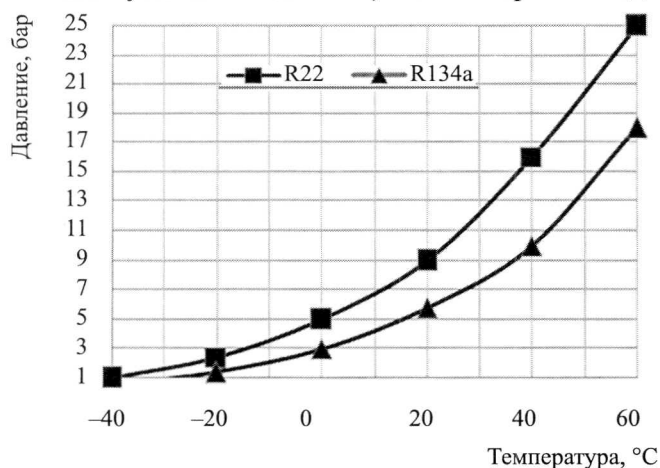


Рис. 7. Сравнение уровней давления конденсации для хладагентов R22 и R134a

ходит и для перевода на него существующих установок, работающих на R22, однако применение процедуры такого ретрофита не всегда возможно, поскольку не все ранее установленные компрессоры пригодны для работы на R134a. Кроме того, перевод на R134a требует произвести замену масла, что не подходит, например, для большинства герметичных компрессоров.

Возникают также и экономические соображения, особенно в отношении старых установок, для которых затраты на перевод на R134a сравнительно высоки. Химическая стабильность таких установок часто недостаточна, что ставит под вопрос успешность перевода. Поэтому существующие установки, работающие на R22, без замены вспомогательных узлов могут быть переведены на R134a только ограниченно. При техническом обслуживании компрессора (не считая замены масла) теплообменник и сосуд высокого давления пригодны для работы на R134a, однако холодопроизводительность и потребляемая мощность при той же объемной производительности компрессора после перевода установки на R134a существенно уменьшаются. Разность температур испарения и конденсации будет значительно меньше.

Кроме того, необходимо встраивать в холодильный контур относительно крупные фильтры-осушители, которые должны также соответствовать более малому размеру молекул R134a.

**Хладагент R1234yf.** Недавно синтезирован новый хладагент — тетрафторпропилен R1234yf ( $ODP = 0$ ), имеющий низкий потенциал глобального потепления  $GWP = 4$ .

В нормативе ЕС указано, что с 1 января 2011 г. все транспортные средства новой модели должны использовать для систем кондиционирования воздуха хладагент R1234yf, критическая температура которого  $t_{кр} = 95,65^\circ\text{C}$ , поэтому он может быть рекомендован для применения в регионах с высокой температурой окружающей среды. Этот новый газ со временем заменит традиционный R134a, который будет еще использоваться концернами-производителями до 2017 г. в транспортных средствах старых моделей. Хладагент R1234yf прошел все надзорные инстанции в США и рекомендован для автомобильных кондиционеров.

Поскольку хладагент R1234yf оказывает меньший вред окружающей среде, то его применение требует рассмотрения на долгосрочную перспективу использования, так как в будущем Европа планирует применять холодильные агенты с  $GWP$  не более 50. Однако R1234yf был признан как легковоспламеняющийся. Данный факт требует принятия специальных конструктивных решений, во избежание пожара. Для этого надо иметь систему высоконапорных вентиляторов большой производительности, чтобы исключить возможность застаивания газа внутри помеще-

Таким образом, на основе проведенного обзора можно сделать заключение, что в настоящее время наиболее приемлемыми в регионах с высокой температурой окружающей среды в качестве альтернативных для R22 являются хладагенты R404A, R407, R507 и R134a.

Оптимальные температурные области применения хладагентов показаны на рис. 8 [3].

Термодинамический расчет эффективности различных хладагентов с учетом условий эксплуатации

Термодинамические параметры цикла холодильной машины, работающей в режиме кондиционирования (температура кипения  $t_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расчетная температура конденсации  $t_{p,k} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для различных хладагентов, применяемых для замены хладагента R22, приведены в табл. 1.

Расчет относительных термодинамических параметров произведен относительно заменяемого хладагента R22. В таблице даны следующие обозначения: относительный удельный объем  $\bar{v}_1$ , относительный объем  $\bar{V}$ , относительный массовый расход  $\bar{G}$ . Холодильный коэффициент  $\bar{\epsilon}$  у всех холодильных агентов, кроме R134a—меньше, чем у R22. Массовая удельная холодопроизводительность у всех холодильных агентов меньше единицы, но наиболее близкая к R22 у хладагента R134a ( $\bar{q}_0 = 0,92$ ). Сравнение циклов с различными хладагентами показано на рис. 9.

Удельная объемная холодопроизводительность изменяется от  $\bar{q}_v = 0,65$  до единицы. Самая низкая объемная холодопроизводительность у R134a ( $\bar{q}_v = 0,65$ ). Давление конденсации у всех хладагентов выше, чем у R22 кроме R134a. Максимальное давление конденсации  $\bar{p}_k = 1,19$  у хладагентов R404A, R407B и R507 и минимальное  $\bar{p}_k = 0,70$  у R134a. Удельная работа  $\bar{e}$  у всех хладагентов отличается незначительно и изменяется от 0,78 до 0,91. Потребляемая мощность  $\bar{N}$  у всех машин, работающих на рассматриваемых хладагентах, повышается относительно R22 от 17 до 44 %.

В результате проведенного термодинамического расчета эффективности различных хладагентов с учетом условий эксплуатации были сделаны следующие заключения:

- 1. Все рассматриваемые холодильные агенты (R404A, R407B, R507 и R134a) за исключением R134a имеют давление конденсации выше, чем у существующего хладона R22, на 19 %.
- 2. Рекомендуется применять хладон R134a, у которого при заданном температурном режиме давление конденсации на 30 % ниже, чем у хладона R22 (при заданных условиях эксплуатации).
- 3. При работе на хладоне R134a по сравнению с R22 повышение потребляемой мощности на 28 % связано с увеличением объемной производительности компрессора. Удельная энергия, затрачиваемая на сжатие пара, на 9 % меньше, а холодильный коэффициент на 1 % больше.

Таблица 1

Относительные термодинамические характеристики холодильной машины

| Тип   | $\bar{\epsilon}$ | $\bar{q}_0$ | $\bar{v}_1$ | $\bar{q}_v$ | $\bar{V}$ | $\bar{p}_k$ | $\bar{e}$ | $\bar{G}$ | $\bar{N}$ |
|-------|------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| R22   | 1                | 1           | 1           | 1           | 1         | 1           | 1         | 1         | 1         |
| R404A | 0,69             | 0,60        | 0,722       | 0,842       | 1,187     | 1,19        | 0,875     | 1,644     | 1,44      |
| R407B | 0,76             | 0,59        | 0,888       | 0,668       | 1,497     | 1,19        | 0,781     | 1,686     | 1,32      |
| R507  | 0,85             | 0,66        | 0,666       | 0,996       | 1,004     | 1,19        | 0,781     | 1,507     | 1,17      |
| R134a | 1,01             | 0,92        | 1,416       | 0,646       | 1,547     | 0,70        | 0,906     | 1,092     | 1,28      |

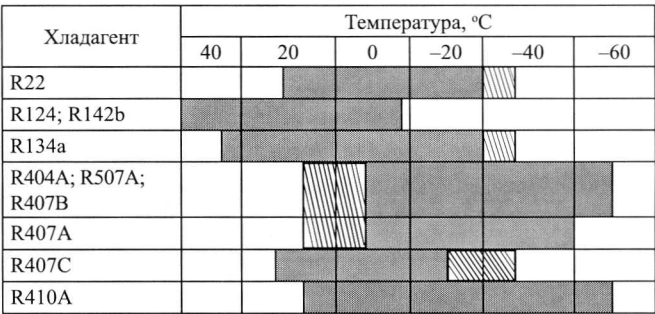


Рис. 8. Оптимальные температурные области применения хладагентов: ■ — оптимальная зона; ▨ — применение с ограничениями; □ — непригодно

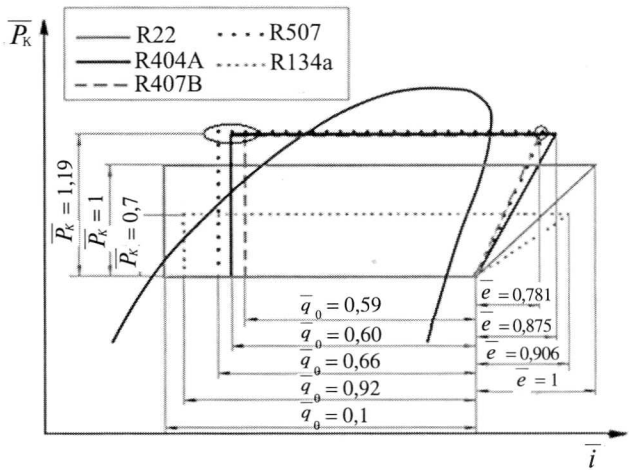


Рис. 9. Сравнение циклов с различными хладагентами

Максимальные температуры конденсации для разных типов компрессоров при применении различных холодильных агентов даны в табл. 2 [3].

С учетом условия, что холодильные машины работают при расчетной температуре конденсации  $t_{k,p} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , обеспечивается стабильная и гарантированная работа компрессора, заправленного только хладагентом R134a:

- поршневой компрессор работоспособен до  $t_{k,max} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- спиральный компрессор работоспособен до  $t_{k,max} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- винтовой сальниковый компрессор работоспособен до  $t_{k,max} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

— винтовой полугерметичный компрессор работоспособен до  $t_{к\max} = 65^\circ\text{C}$ .

Таблица 2

**Максимальные температуры конденсации для компрессоров с разными хладагентами**

| Наименование компрессора | Тип хладагента | $t_{к\max}$ |
|--------------------------|----------------|-------------|
| Поршневой                | R22            | 62          |
|                          | R407C          | 62          |
|                          | R404A          | 55          |
|                          | R507A          | 55          |
|                          | R717           | 55          |
|                          | R134a          | 80          |
| Спиральный               | R22            | 65          |
|                          | R407C          | 65          |
|                          | R404A          | 55          |
|                          | R507A          | 55          |
|                          | R134a          | 70          |
| Винтовой сальниковый     | R404A          | 55          |
|                          | R507A          | 55          |
|                          | R134a          | 70          |
| Винтовой полугерметичный | R404A          | 55          |
|                          | R507A          | 55          |
|                          | R22            | 60          |
|                          | R134a          | 65          |

## Выводы

В результате обзорного и расчетно-теоретического анализа альтернативных для R22 хладагентов в регионах с высокой температурой окружающей среды наиболее оптимальным в настоящее время является хладагент R134a с категорией пожароопасности A1; ODP = 0; GWP = 1300;  $t_{кр} = 101,1$ .

В долгосрочной перспективе, для использования в холодильных машинах из известных на сегодняшний день хладагентов наиболее приемлемым является хладагент R1234yf с категорией пожароопасности A2; ODP = 0; GWP = 4;  $t_{кр} = 95,65$ .

## Список литературы

1. Цветков О. Б. CFC-, HCFC- и HFC-хладагенты в перспективе экологического алармизма // Холодильная техника. 2011. № 8.
2. Целиков В. Н. Организация системы государственного регулирования оборота озоноразрушающих веществ и содержащей их продукции на территории Российской Федерации в 2011–2015 гг. // Холодильная техника. 2011. № 8.
3. Bitzer. Обзор хладагентов. Издание 13. A-501–13. 2004.
4. Термодинамические диаграммы  $i\text{--lg}P$  для хладагентов. — М.: АВИСАНКО, 2003.