

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья

УДК 664

DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-66-01>

Сравнение эффективности сверхкритических систем углекислого газа с альтернативными хладагентами

Нурсултан Эсенбекович Алдаматы¹, Сергей Алексеевич Бредихин²

^{1, 2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

¹ Status_Diamond@bk.ru

² Sbredihin_kpia@rgau-msha.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

Аннотация. Холодильная промышленность претерпела значительные изменения в последние годы. В прошлом хлорфторуглероды (ХФУ), такие как R12, были широко использованы в холодильной технике, но были признаны вредными для озонового слоя и заменены на гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), например, R22. Недавно были разработаны более экологически безопасные вещества – гидрофторуглероды (ГФУ), включая R404A, R507A и R407C. В настоящее время эти ГФУ являются наиболее популярными хладагентами для среднетемпературного охлаждения (от минус 5 °C до +5 °C). Хотя большинство ГФУ имеют нулевой потенциал разрушения озонового слоя (ОРС), они все еще значительно влияют на глобальное потепление из-за своего высокого потенциала глобального потепления (ПГП). Именно поэтому сейчас все больше внимания уделяется природным хладагентам, которые рассматриваются как потенциальное решение на будущее. Они обладают благоприятными экологическими свойствами, такими как нулевой уровень ОРС и низкий ПГП по сравнению с традиционными ХФУ и ГХФУ веществами [1]. Среди натуральных хладагентов, которые привлекают интерес в современной холодильной индустрии, можно выделить углекислый газ (R744) и пропан (R290). Углекислый газ не только не разрушает озоновый слой, но и имеет очень низкий ПГП. Пропан также является перспективным натуральным хладагентом, который обладает низким ПГП и не вредит окружающей среде.

Проведен сравнительный анализ эффективности сверхкритических циклов R744 для использования в среднетемпературном охлаждении. Было произведено сравнение с одним из самых распространенных хладагентов в настоящее время – R404A, а также с пропаном (R290), который обладает наибольшей конкурентоспособностью среди природных рабочих веществ. Целью исследования было определение коэффициента полезного действия (КПД) и выявление возможностей увеличения данного показателя в сверхкритических системах с углекислым газом.

Ключевые слова: холод, углекислый газ, коэффициент полезного действия, хлорфторуглероды, гидрохлорфторуглероды, сверхкритические системы, озоновый слой, потенциал глобального потепления, промышленность, экология

Для цитирования: Алдамагов Н.Э., Бредихин С.А. Сравнение эффективности сверхкритических систем углекислого газа с альтернативными хладагентами // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 66, № 4. С. 8–17.

FOOD SYSTEMS

Original article

DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-66-01>

**Comparison of the efficiency of supercritical carbon dioxide systems
with alternative refrigerants**

Nursultan E. Aldamatov¹, Sergey A. Bredihin²

^{1, 2} Russian Timiryazev State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

¹ Status_Diamond@bk.ru

² Sbredihin_kpia@rgau-msha.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

Abstract. The refrigeration industry has undergone significant changes in recent years. In the past, chlorofluorocarbons (CFCs), such as R12, were widely used in refrigeration, but were found to be harmful to the ozone layer and replaced with hydrochlorofluorocarbons (HCFCs), for example, R22. Recently, more environmentally friendly substances have been developed - hydrofluorocarbons (HFCs), including R404A, R507A and R407C. Currently, these HFCs are the most popular refrigerants for medium-temperature cooling (from minus 5 C to +5 C). Although most HFCs have zero ozone depletion potential (ODP), they still contribute significantly to global warming due to their high global warming potential (GWP). That is why now more and more attention is being paid to natural refrigerants, which are considered as a potential solution for the future. They have favorable environmental properties, such as zero ODP and low GWP compared to traditional CFCs and HCFCs substances [1]. Among the natural refrigerants that attract interest in the modern refrigeration industry, carbon dioxide (R744) and propane (R290) can be distinguished. Not only does it not destroy the ozone layer, but it also has a very low GWP. Propane is also a promising natural refrigerant, which has a low GWP and does not harm the environment.

In this article, a comparative analysis of the efficiency of supercritical cycles R744 for use in medium-temperature cooling was carried out. A comparison was made with one of the most common refrigerants at present - R404A, as well as with propane (R290), which has the greatest competitiveness among natural working substances. The purpose of the study was to determine the efficiency and identify the possibilities of increasing this indicator in supercritical systems with carbon dioxide.

Keywords: cold, carbon dioxide, efficiency, chlorofluorocarbons, hydrochlorofluorocarbons, supercritical systems, ozone layer, global warming potential, industry, ecology

For citation: Aldamatov N.E., Bredihin S.A. Comparison of the efficiency of supercritical carbon dioxide systems with alternative refrigerants // *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2023; 66(4):8–17. (in Russ.).

Введение

Холодильная машина (ХМ) обычно работает по принципу цикла сжатия пара, который позволяет переносить тепло из области с низкими температурами в область с высокими. Ос-

Основные компоненты парокомпрессионной холодильной машины включают компрессор, конденсатор, регулятор потока и испаритель (рис. 1). Процесс работы холодильной машины начинается с того, что компрессор всасывает газообразный хладагент с низким давлением из испарителя, сжимает его и повышает давление до уровня конденсации. Затем сжатый хладагент поступает в конденсатор, где он изменяет свое агрегатное состояние с газообразного на жидкое. Жидкий хладагент направляется в регулятор потока, где происходит резкое снижение давления. Это приводит к изменению состояния хладагента из жидкого в парожидкостное и сопровождается значительным понижением его температуры. Парожидкостная смесь затем поступает в испаритель, где она отводит тепло от охлаждаемой среды. В результате этого процесса хладагент полностью превращается в газообразное состояние, и цикл повторяется снова. Однако, помимо основных компонентов, существуют и другие элементы, которые могут быть включены в холодильную систему для повышения ее эффективности. Например, применение теплового насоса позволяет использовать окружающую среду для дополнительного нагрева или охлаждения хладагента, что позволяет снизить энергопотребление системы. Также важно отметить, что выбор хладагента играет существенную роль в работе холодильной системы. Различные хладагенты имеют разные тепловые свойства, что может повлиять на эффективность системы и ее экологическую безопасность. Например, некоторые хладагенты могут быть потенциально вредными для окружающей среды и требовать специальных мер предосторожности при их использовании. В зависимости от конкретных требований и условий холодильные системы могут быть адаптированы для различных целей. Например, они могут использоваться для охлаждения продуктов питания в супермаркетах, поддержания оптимальной температуры в лабораториях или для создания комфортных условий в жилых помещениях [3, 4].

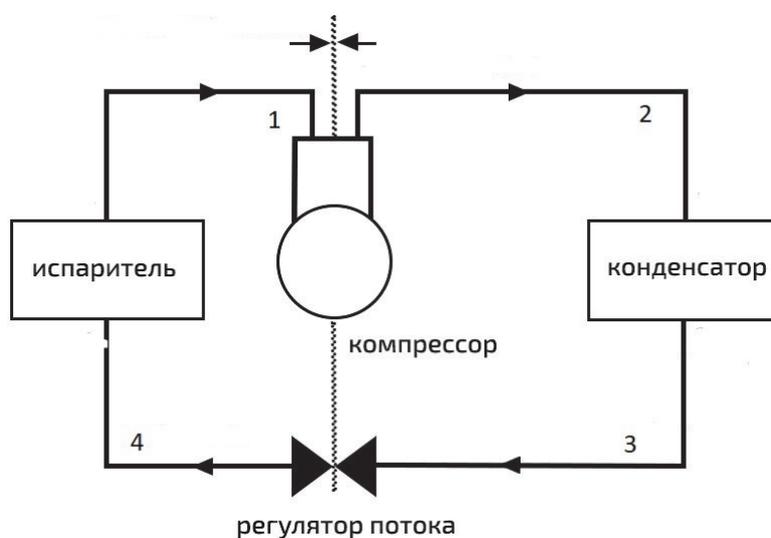


Рис. 1. Основные компоненты холодильной машины
Fig. 1. The main components of the refrigerating machine

Энтальпия является одним из ключевых термодинамических свойств хладагента, которое определяет эффективность холодильной машины. Для определения этой характеристики используется диаграмма давление–энтальпия ($P-i$), где ось абсцисс представляет величину энтальпии, а ось ординат – значения давления. На рис. 2 представлена схема цикла и соответствующие диаграммы для трех хладагентов: R744, R404A и R290. В данном случае рассматривается температура испарения минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температура конденсации $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. На диаграмме циклов обозначены точки 1, 2, 3 и 4, которые соответствуют точкам в базовом цикле холодильной машины на рис. 1. Точка 1 представляет всасывающий тракт компрессора с га-

зообразным рабочим веществом. Точка 2 указывает на повышение давления после компрессора. В точке 3 происходит фазовый переход, сопровождающийся уменьшением величины энтальпии перед расширительным устройством. Точка 4 отражает область парожидкостного состояния хладагента в испарителе. Анализ рис. 2 позволяет сделать несколько наблюдений. Во-первых, различные рабочие вещества имеют разные значения рабочих давлений при одинаковых температурах кипения и конденсации. Например, в цикле R744 газ испаряется и охлаждается при гораздо более высоких давлениях, чем в циклах R404A и R290. Это говорит о том, что различные хладагенты имеют разные условия работы и требуют соответствующих параметров в холодильной системе. Кроме того, диапазон рабочих энтальпий для разных хладагентов также различен. Это означает, что разные вещества имеют разный потенциал отвода теплоты, который определяется разностью энтальпий [1].

Объекты и методы исследований

В данном исследовании было проведено сравнение различных хладагентов с одинаковыми температурами кипения и конденсации для определения их коэффициента полезного действия. Объектом исследования были выбраны хладагенты R404A и R290 для одноступенчатого холодильного цикла, а также хладагент R744 – для сверхкритической холодильной машины. В процессе исследования были внедрены различные элементы в конструкцию установки для сверхкритической машины R744.

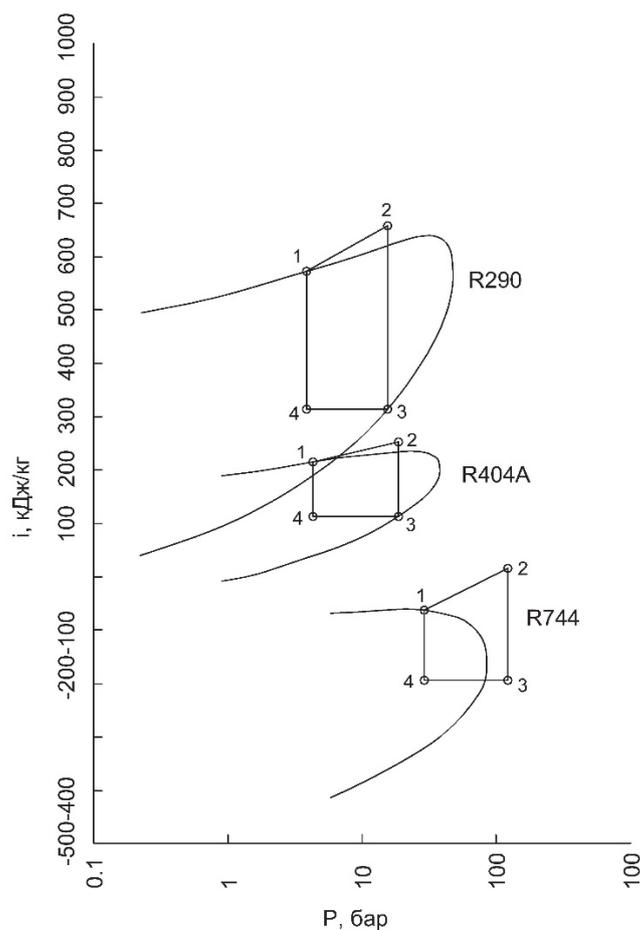


Рис. 2. Термодинамическая схема цикла и соответствующие P–i-диаграммы для хладагентов R744, R404A и R290

Fig. 2. Thermodynamic cycle diagram and corresponding P–i-diagrams for refrigerants R744, R404A and R290

Исследования включали в себя сверхкритические установки с базовым набором элементов одноступенчатой холодильной машины. Дополнительно был включен промежуточный теплообменник при одноступенчатом сжатии, а также промежуточный теплообменник между ступенями при двухступенчатом сжатии. Также была рассмотрена двухступенчатая холодильная машина с промежуточным теплообменником как на линии всасывания, так и между ступенями сжатия. Одной из основных задач исследования было определение коэффициента полезного действия холодильных машин при различных температурах конденсации в зимнем и летнем режимах, соответствующих $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Все холодильные машины работали по циклу, представленному на рис. 1. Далее был определен коэффициент полезного действия при различных температурах испарения хладагента при одноступенчатом сжатии и температурах конденсации $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дополнительно были проведены исследования одноступенчатых циклов с использованием хладагентов R290 и R404A, а также одноступенчатых углекислотных холодильных машин с и без промежуточного теплообменника. Также были рассмотрены двухступенчатые сверхкритические системы с и без промежуточного теплообменника. Это исследование позволило сравнить различные хладагенты и методы установки, а также определить их эффективность в различных условиях эксплуатации.

Коэффициент полезного действия КПД холодильных машин определяется по формуле [2]

$$\text{КПД} = (i_1 - i_4) / (i_2 - i_1),$$

где i_1 – энтальпия в точке всасывания хладагента, кДж/кг; i_2 – энтальпия в точке нагнетания хладагента, кДж/кг; i_4 – энтальпия в точке конца процесса расширения жидкого хладагента после расширительного устройства, кДж/кг.

На рис. 3 представлена схема цикла ХМ с использованием промежуточного теплообменника ПТО при одноступенчатом сжатии. Этот цикл используется для обеспечения переохлаждения жидкого хладагента и защиты компрессора от попадания жидкости. Суть работы такого цикла заключается в том, что жидкий хладагент, поступающий из конденсатора, проходит через ПТО, где происходит его дополнительное охлаждение. Затем охлажденный хладагент попадает в испаритель, где происходит его сжатие до необходимого давления. Таким образом, переохлаждение жидкого хладагента обеспечивает более эффективную работу системы и предотвращает возможное повреждение компрессора от попадания жидкости. Подобный цикл ХМ находит применение в холодильных системах, кондиционерах, промышленных установках и других системах, где важно обеспечить надежную работу компрессора и эффективное охлаждение жидкого хладагента.

На рис. 4 представлен цикл ХМ с ПТО между ступенями сжатия при использовании двухступенчатого сжатия. Этот тип теплообменника позволяет осуществить сжатие холодильного агента в две ступени, что в свою очередь позволяет достичь более низких рабочих температур испарения. Кроме того, такой подход позволяет снизить температуру газа, который подается в конденсатор. Это может быть полезно для увеличения эффективности системы и снижения нагрузки на компоненты, такие как конденсаторы или испарители. Использование промежуточного теплообменника между ступенями также имеет свои преимущества. Он позволяет эффективно использовать тепло, выделяемое при сжатии газа в первой ступени, для нагрева газа перед его входом во вторую ступень. Это позволяет существенно повысить энергоэффективность системы и снизить потребление энергии. Таким образом, цикл холодильной машины с промежуточным теплообменником и двухступенчатым сжатием представляет собой эффективный способ достижения низких рабочих температур и повышения энергоэффективности системы.

Цикл сверхкритической двухступенчатой ХМ с ПТО на линии жидкости и ПТО между ступенями сжатия компрессоров отражает рис. 5.

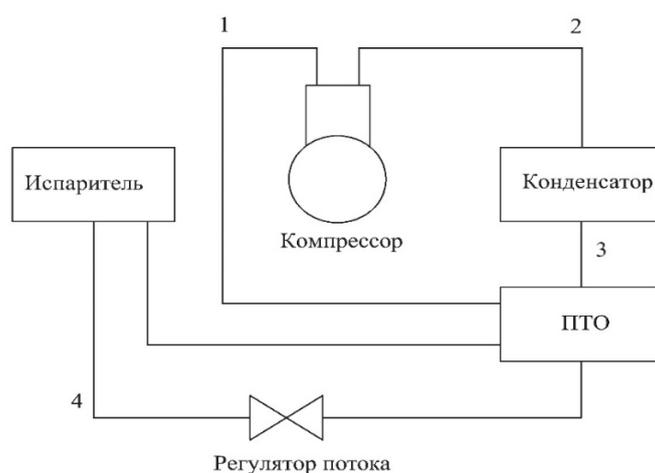


Рис. 3. Цикл холодильной машины с ПТО
Fig. 3. The cycle of a refrigeration machine with a PTO

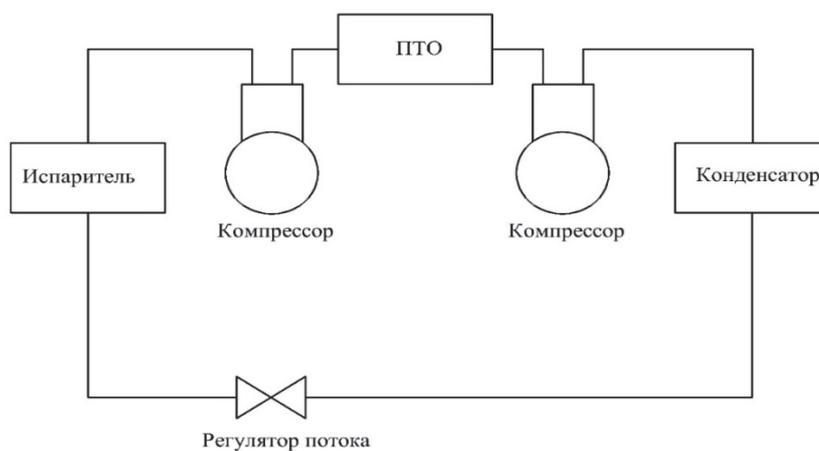


Рис. 4. Цикл ХМ с ПТО между ступенями сжатия
Fig. 4. ХМ cycle with PTO between compression stages

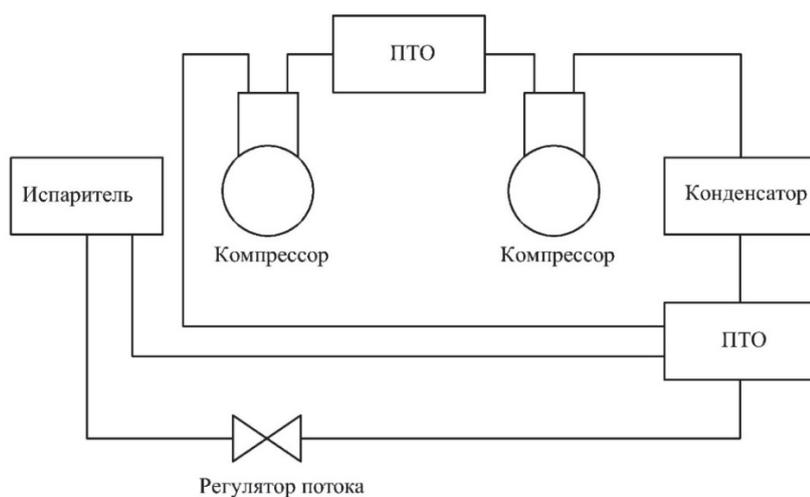


Рис. 5. Цикл сверхкритической двухступенчатой ХМ с ПТО на линии жидкости и ПТО между ступенями сжатия компрессоров
Fig. 5. The cycle of a supercritical two-stage HM with PTO on the liquid line and PTO between the compression stages of compressors

Результаты и их обсуждение

На рис. 6 представлена зависимость КПД от температуры конденсации для трех различных хладагентов. Из графика видно, что при повышении температуры конденсации КПД снижается для всех трех хладагентов. В моделируемом диапазоне температур конденсации R290 демонстрирует самый высокий КПД, за ним следует R404A, а затем R744. Такое поведение объясняется тем, что при повышении температуры конденсации происходит увеличение давления нагнетания компрессора, который отвечает за сжатие рабочего вещества. При одинаковой температуре кипения хладагента, но разной температуре конденсации степень сжатия будет различной. Увеличение степени сжатия приводит к снижению производительности компрессора. Однако, помимо зависимости от температуры конденсации, КПД также может быть оказан влиянием других факторов, таких как эффективность теплопередачи в испарителе и конденсаторе, а также потери тепла в трубопроводах и других элементах системы.

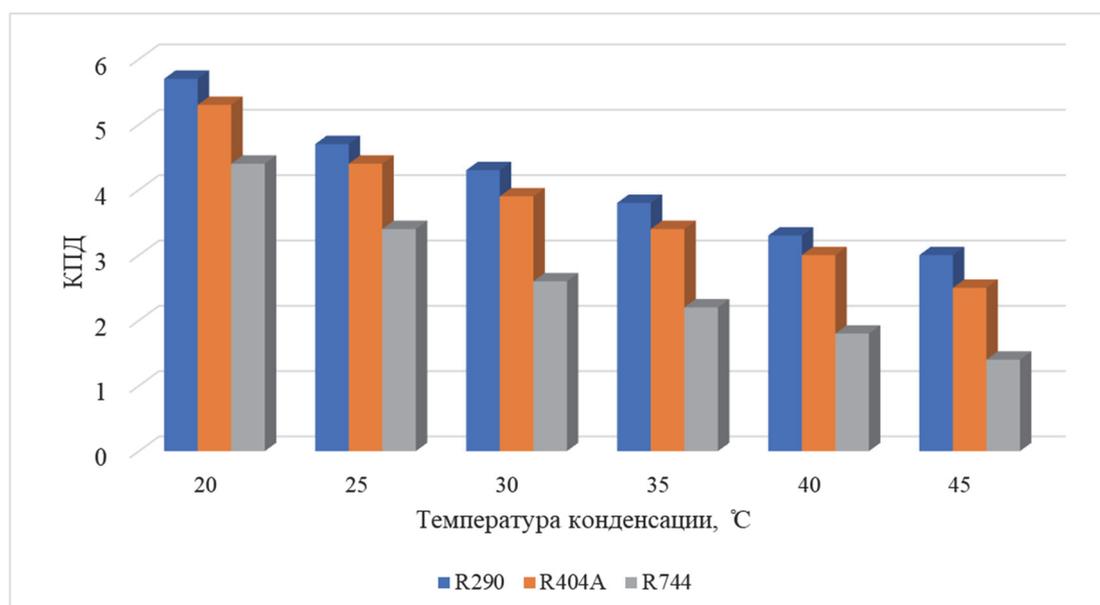


Рис. 6. Зависимость величины КПД от температуры конденсации
Fig. 6. Dependence of the efficiency value on the condensation temperature

На рис. 7 представлен график зависимости КПД от температуры испарения при различных температурах конденсации – 25 °C и 40 °C. Из графика видно, что хладагент R290 обладает самым высоким КПД для обеих температур конденсации, а затем следует R404A. С другой стороны, R744 демонстрирует наименьший КПД при температуре конденсации 25 °C. Однако при температуре отвода тепла 40 °C R744 работает в сверхкритическом режиме, что еще больше снижает его производительность по сравнению с двумя другими хладагентами. С увеличением температуры испарения КПД цикла R744 еще больше отклоняется от КПД циклов R290 и R404A. Это говорит о том, что R744 менее эффективен при более высоких температурах испарения.

На рис. 8 представлена зависимость величины КПД при различных конструктивных исполнениях сверхкритических углекислотных ХМ в сравнении с одноступенчатыми циклами хладагентов R290 и R404A. Из рис. 8 видно, что КПД цикла R744 ниже, чем у циклов R404A и R290 на всем диапазоне температур испарения. Если рассмотреть двухступенчатый цикл R744 с внутренним теплообменником, то его КПД значительно выше, чем у одноступенчатого цикла R744. Тем не менее оба эти цикла имеют более низкий КПД по сравнению с анало-

гичными циклами R404A и R290. Также следует отметить, что производительность циклов R744 улучшается с уменьшением температуры испарения. Это означает, что при более низких температурах испарения циклы R744 становятся более эффективными и способными обеспечивать более высокую производительность.

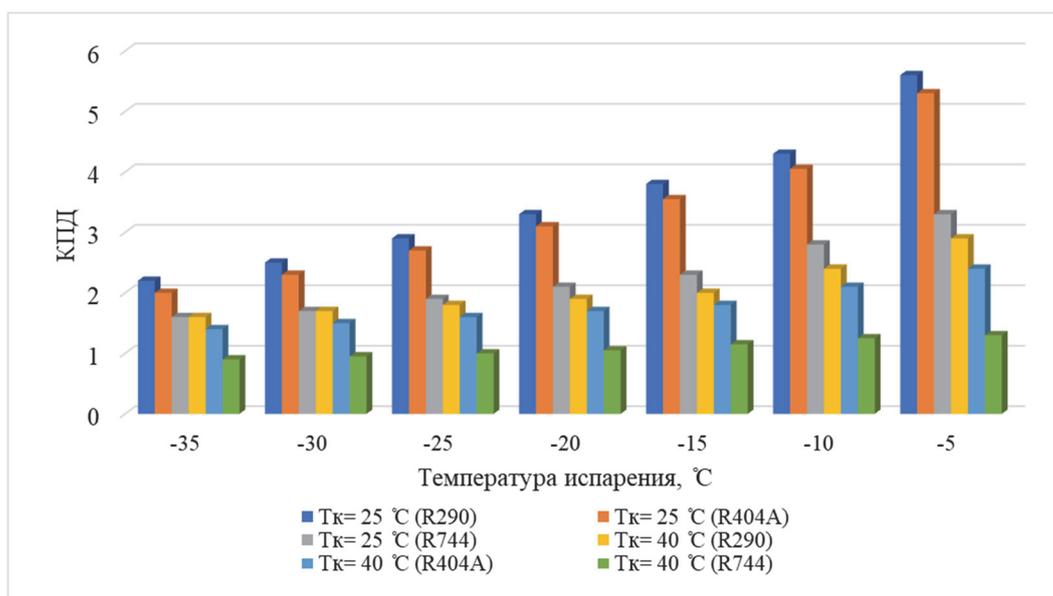


Рис. 7. Зависимость величины КПД от температуры испарения при температурах конденсации 25 °C и 40 °C

Fig. 7. Dependence of the efficiency value on the evaporation temperature at condensation temperatures of 25 °C and 40 °C

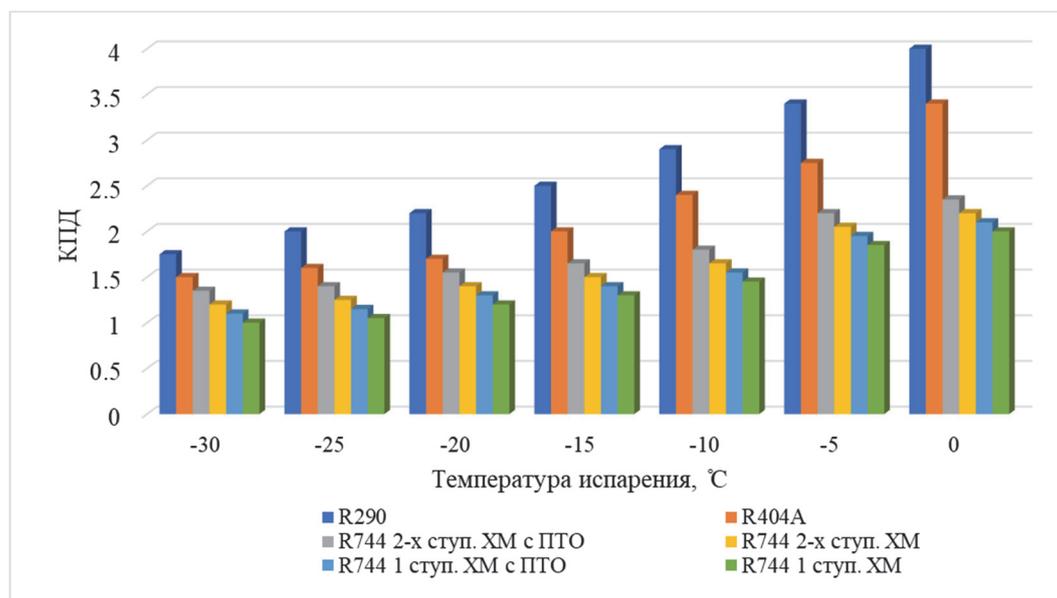


Рис. 8. Зависимость величины КПД при различных конструктивных исполнениях сверхкритических углекислотных ХМ в сравнении с одноступенчатыми циклами хладагентов R290 и R404A

Fig. 8. Dependence of the efficiency value for various designs of supercritical carbon dioxide HMS in comparison with single-stage cycles of refrigerants R290 and R404A

Заключение

Результаты общего анализа показывают, что наиболее эффективным из исследованных хладагентов является R290. Это рабочее вещество демонстрирует высокую энергоэффективность при различных температурах конденсации и испарения. Холодильная машина, работающая на пропане, также обладает наивысшей эффективностью по сравнению с машинами, использующими углекислый газ. Эта зависимость сохраняется даже при понижении температуры конденсации до +25 °С. Пропан также отличается тем, что повышение температуры испарения сопровождается более значительным увеличением КПД. Это означает, что пропан обладает большим потенциалом для применения в области среднетемпературного охлаждения по сравнению с искусственными хладагентами. Однако, несмотря на высокую эффективность, пропан является легковоспламеняемым и пожароопасным веществом, что ограничивает его широкое использование.

Кроме того, пропан не имеет цвета и запаха, что затрудняет обнаружение потенциальных утечек в системе. В отличие от пропана R404A обладает более низкой энергоэффективностью, но его КПД выше, чем у R744. Эффективность R404A изменяется более равномерно при изменении температуры конденсации и испарения. Благодаря своей негорючести и нетоксичности, R404A пользуется популярностью в коммерческом использовании. R744, или углекислый газ, показал самые низкие значения КПД среди всех исследуемых веществ. Однако путем внедрения дополнительных элементов, таких как промежуточный теплообменник или промежуточный охладитель, можно увеличить эффективность сверхкритических холодильных машин, работающих на углекислом газе, и приблизить их КПД к искусственным хладагентам. Несмотря на низкие значения КПД, холодильные машины, работающие на рассмотренных хладагентах, все равно имеют свои преимущества и применение в различных областях.

Результаты исследования также указывают на то, что использование углекислого газа в сверхкритических циклах может привести к повышению эффективности системы охлаждения. Углекислый газ, или R744, является экологически чистым альтернативным хладагентом, так как он не содержит хлорфторуглеродов (ГФУ) или других веществ, разрушающих озоновый слой. Кроме того, углекислый газ обладает низким потенциалом глобального потепления, что делает его привлекательным с точки зрения борьбы с изменением климата. Однако, несмотря на все преимущества углекислого газа, его использование в холодильной промышленности до сих пор ограничено. Это связано с высокой стоимостью и сложностью технологий, необходимых для работы с углекислым газом в сверхкритических циклах. Тем не менее с развитием новых технологий и повышением осведомленности о преимуществах углекислого газа интерес к нему в мировом сообществе холодильной промышленности продолжает расти.

Таким образом, использование углекислого газа в сверхкритических системах представляет собой перспективное решение для будущего охлаждения. Это позволит снизить негативное влияние на окружающую среду и улучшить энергоэффективность систем охлаждения. С развитием технологий и снижением затрат углекислый газ может стать широко применяемым хладагентом, способствующим устойчивому развитию и защите окружающей среды.

Список источников

1. Запрет фреонов // ООО «Рефинжиниринг». URL: <https://refeng.ru/blog/zapret-freonov/> (дата обращения: 05.11.23).
2. Комарова Н.А. Холодильные установки. Основы проектирования: учеб. пособие. М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», 2012. 368 с.

3. Процессы и аппараты пищевой технологии / Бредихин С.А., Бредихин А.С., Жуков В.Г., Космодемьянский Ю.В., Якушев А.О.; под ред. С.А. Бредихина. Изд. 2. СПб.: Лань, 2022. 544 с.

4. Индустриальные технологические комплексы продуктов питания / С.Т. Антипов, С.А. Бредихин, В.Ю. Овсянников, В.А. Панфилов; под ред. академика РАН В.А. Панфилова. СПб.: Лань, 2020. 440 с.

References

1. Zapret freonov // LLC «Refinginiring». <https://refeng.ru/blog/zapret-freonov/> (date of circulation: 05.11.23).

2. Komarova N.A. Holodeepter launchers. Basics. projects: educational tools. M.: Federal state government budget educational institution in the Apostille of professional education «Kemerovo Technological Institute pishevoy promulgation», 2012. 368 p.

3. Processs aposematic and apparat urgentevoy technologies / Bredikhin S.A. Bredikhin A.S., Zhukov V.G., Kosmodemyansky Yu.V., Yakushev A.Oh.; in order. S.A. Bredikhina. , Ed. 2. St. Petersburg: Lange, 2022. 544 p.

4. Industrial and technological complex / S.T. Antipov, S.A. Bredikhin, V.Yu. Ovsyannikov, V.A. Panfilov; Ed. akademika RAN V.A. Panfilova. St. Petersburg: Lange, 2020. 440 p.

Информация об авторах

Н.Э. Алдамагов – аспирант кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств;

С.А. Бредихин – доктор технических наук, профессор, SPIN-код: 1267-3480, Author ID: 1766859.

Information about the authors

N.E. Aldamatov – Postgraduate student of the Department of Processes and Devices of Processing Industries;

S.A. Bredihin – Doctor of Technical Sciences, Professor, SPIN-code: 1267-3480, Author ID: 1766859.

Статья поступила в редакцию 29.11.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 01.12.2023.

The article was submitted 29.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 01.12.2023.