DOI: https://doi.org/10.17816/RF632560

Выбор хладагента для применения в холодильных машинах для охлаждения жидкости (чиллерах)

М. С. Талызин[1], А. В. Сколов[2]

[1] Международная Академия Холода, Москва, Российская Федерация;
[2] ООО «Лекма Холод», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Холодильные установки для охлаждения жидкостей (чиллеры) широко используются в промышленности. Основную область их применения можно определить следующим образом: чиллеры применяются в случае невозможности охлаждения продукта через непосредственный теплообмен между кипящим хладагентом и охлаждаемой средой. В качестве причины может выступать и стоимость хладагента, когда при большой длине магистралей хладагента требуется большое количество дорогостоящего вещества, и применение токсичных и пожароопасных хладагентов, когда утечка хладагента может привести к человеческим жертвам. Для данной категории холодильных машин можно условно выделить три области: высокотемпературную (производство изделий из пластика, центры обработки данных и т. д.), среднетемпературную (чиллеры для систем кондиционирования и т. д.) и низкотемпературную (чиллеры для ледовых полей, хранения пищевых продуктов).

Поскольку области применения чиллеров обширны, а объем их производства высок, то проектирование эффективного оборудования является важной задачей.

Цель работы — дать обоснование применению хладагентов с точки зрения эффективности и долговечности работы холодильного оборудования.

Методы. Проведено исследование потерь чиллеров, предназначенных для работы в разных отраслях промышленности (температуры хладоносителя (вход в испаритель / выход из испарителя): плюс 26°C / плюс 20°C (ВТ); плюс 12°C / плюс 7°C (СТ); минус 10°C / минус 13°C (НТ)), работающих с холодильными агентами R134a, R410A, R404A и R1270 энтропийно-статистическим методом термодинамического анализа [1]. R1270 включен в анализ как перспективный хладагент для использования в моноблочных чиллерах, поскольку для чиллеров моноблочного исполнения, устанавливаемых в открытом пространстве, ограничения по заправке отсутствуют [2].

Результаты. Из рассматриваемых хладагентов высокие показатели степени термодинамического совершенства на режиме ВТ получены для чиллеров с хладагентом R1270 — на 11,97% данный показатель выше, чем у чиллера с хладагентом R404A, на 2,15% чем у чиллера с хладагентом R134a и на 5,48% выше, чем у чиллера с хладагентом R410A.

На режиме СТ чиллер с хладагентом R1270 продемонстрировал лучшие показатели степени термодинамического совершенства — на 14,13% данный показатель выше, чем у чиллера с хладагентом R404A, на 3,04% чем у чиллера с хладагентом R134a и на 3,41% выше, чем у чиллера с хладагентом R410A.

На режиме НТ чиллер с хладагентом R1270 продемонстрировал также лучшие показатели степени термодинамического совершенства — на 21,95% данный показатель выше, чем у чиллера с хладагентом R404A, на 29,73% чем у чиллера с хладагентом R134a и на 11,44% выше, чем у чиллера с хладагентом R410A.

Применение хладагентом R410A и R134a при работе на НТ режиме ограничивается температурой нагнетания при действительном процессе сжатия — для R410A она составляет 116,94°C, для R134a — 114,63°C, что снижает срок службы оборудования. Самую низкую температуру при действительном сжатии 84,63°C можно получить, используя хладагент R404A. Температура нагнетания при использовании хладагента, несмотря на высокие показатели эффективности, составляет 96,84°C, что является достаточно высокой величиной.

Заключение. Результаты анализа показали области применения определенных хладагентов в чиллерах, а также перспективность применения природного хладагента R1270, который производится на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: энтропийно-статистический метод анализа; эффективность; природные хладагенты; чиллеры.

Как цитировать:
Талызин М.С., Сколов А.В. Выбор хладагента для применения в холодильных машинах для охлаждения жидкости (чиллерах) // Холодильная техника. 2024. Т. 113, № 1. С. 13–20. DOI: https://doi.org/10.17816/RF632560

Рукопись получена: 23.05.2024 **Рукопись одобрена:** 25.09.2024 **Опубликована online:** 05.10.2024

ЭКО•ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/RF632560

Selection of refrigerant for use in chillers

M.S. Talyzin[1], A.V. Skolov[2]

[1] International Academy of Refrigeration, Moscow, Russian Federation;
[2] LLC «Lekma Holod», Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Chillers (chillers) are essential components in various industrial processes. They are primarily used when direct cooling through direct heat exchange between the boiling coolant and the cooled medium is not feasible. This could be attributed to the cost of the refrigerant, especially when a large amount of expensive substances for long refrigerant lines is needed, or the risks associated with using toxic and flammable refrigerants, which could be hazardous in case of leaks. Chillers are typically classified into three types based on their temperature applications: high-temperature chillers for uses like plastic manufacturing and data centers, medium-temperature chillers for air conditioning systems, etc.) and low-temperature chillers for applications like ice fields and food storage.

Given their widespread use and high production volume, designing efficient chillers is an important task.

AIMS: Substantiating refrigerant use in terms of efficiency and service life of refrigeration equipment.

MATERIALS AND METHODS: Chillers are designed for various industrial applications, with specific inlet and outlet temperatures for the evaporator: +26°C / + 20°C (BT); +12°C / +7°C (ST); –10°C / –13°C (HT)). These chillers operate using refrigerants R134a, R410A, R404A, and R1270, evaluated through an entropy-statistical method of thermodynamic analysis [1]. R1270 is highlighted as a promising refrigerant for monoblock chillers, since there are no filling restrictions for these chillers when installed in open space [2].

RESULTS: Among the refrigerant reviewed, R1270 demonstrates the highest thermodynamic efficiency in BT mode, outperforming R404A by 11.97%, R134a by 2.15%, and R410A by 5.48%.

In CT mode, R1270 also leads,–with a 14.13% advantage over R404A, 3.04% over R134a, and 3.41% over R410A.

Similarly, in HT mode, R1270 shows superior thermodynamic performance, being 21.95% more efficient than R404A, 29.73% more than R134a, and 11.44% more than R410A.

The use of R410A and R134a in NT mode is limited owing to high discharge temperatures during compression, namely 116.94°C for R410A and 114.63°C for R134a, potentially reducing equipment lifespan. The lowest discharge temperature during actual compression, 84.63°C, is achieved using R404A coolant. However, despite its efficiency, this refrigerant results in a relatively high discharge temperature of 96.84°C.

CONCLUSIONS: The analysis highlights specific applications for various refrigerants in chillers and underscores the potential of natural refrigerant R1270, which is produced in the Russian Federation.

Keywords: entropy-statistical method of analysis; efficiency; natural refrigerants; chillers.

To cite this article:
Talyzin MS, Skolov AV. Selection of refrigerant for use in chillers. *Refrigeration Technology.* 2024;113(1):13–20. DOI: https://doi.org/10.17816/RF632560

Received: 23.05.2024 **Accepted:** 25.09.2024 **Published online:** 05.10.2024

ECO•VECTOR

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2024

ОБОСНОВАНИЕ

Холодильные установки для охлаждения жидкостей(чиллеры) широко используются в промышленности. Основную область их применения можно определить следующим образом: чиллеры применяются в случае невозможности охлаждения продукта через непосредственный теплообмен между кипящим хладагентом и охлаждаемой средой. В качестве причины может выступать и стоимость хладагента, когда при большой длине магистралей хладагента требуется большое количество дорогостоящего вещества, и применение токсичных и пожароопасных хладагентов, когда утечка хладагента может привести к человеческим жертвам. Для данной категории холодильных машин можно условно выделить три области: высокотемпературную (производство изделий из пластика, центры обработки данных и т.д.), среднетемпературную (чиллеры для систем кондиционирования и т.д.) и низкотемпературную (чиллеры для ледовых полей, хранения пищевых продуктов).

Традиционно для высоко и среднетемпературных чиллеров применялись хладагенты R410A, R407C, R134a, а для низкотемпературных — R404A, R507A и некоторые другие.

Как правило, обоснование применения того или иного типа хладагента не приводилось. В ряде случаев оно основывалось на типе применяемых компрессоров, например, винтовые компрессоры, работающие с R134a, производятся серийно, а с R410A — нет.

Поскольку области применения чиллеров обширны, а объем их производства высок, то проектирования эффективного оборудования является важной задачей. Поэтому необходимо научное обоснование применения того или иного хладагента для разных температурных уровней [3].

Мы исключили из рассмотрения зеотропные хладагенты такие, как R407C из-за сложностей, связанных с эксплуатацией оборудования, работающего с данными хладагентами. Однако добавили к сравнению хладагент R1270 как перспективный с точки зрения применения в холодильной технике.

Цель исследования — дать обоснование применению хладагентов с точки зрения эффективности и долговечности работы холодильного оборудования.

МЕТОДЫ

Ниже приведен анализ чиллеров, работающих по циклу одноступенчатого сжатия с однократным дросселированием для хладагентов R134a, R404A, R410A и R1270. В качестве метода анализа применялся энтропийно-статистический метод термодинамического анализа.

Исходные данные для анализа чиллера, работающего на режиме ВТ приведены в табл. 1, для анализа чиллера, работающего на режиме СТ приведены в табл. 2, для анализа чиллера, работающего на режиме ВТ — приведены в табл. 3. Значения адиабатного КПД компрессора принимались на основании данных, указанных в программе подбора компрессоров Select 8.7.2.3519. Принципиальная схема цикла приведена на рис. 1.

Для анализа использовались следующие основные зависимости:

- удельная массовая холодопроизводительность

$$q_o = h_5 - h_{1.2} \quad (1)$$

- массовый расход

$$G = \frac{Q_o}{q_o} \quad (2)$$

- средняя логарифмическая температура хладоносителя

$$T_п = \frac{T_{вх} - T_{вых}}{LN(\frac{T_{вх}}{T_{вых}})} \quad (3)$$

Таблица 1. Исходные данные для анализа чиллера на режиме ВТ

Table 1. Initial data for chiller analysis at HT

Температура кипения, °С (К)	+15 (288)
Температура конденсации, °С (К)	+45 (318)
Температура окружающей среды, °С (К)	+32 (305)
Перегрев на всасывании, К	10
Переохлаждение, К	0
Холодопроизводительность Qo, кВт	100

Таблица 2. Исходные данные для анализа чиллера на режиме СТ

Table 2. Initial data for chiller analysis at MT

Температура кипения, °С (К)	+3 (275)
Температура конденсации, °С (К)	+45 (318)
Температура окружающей среды, °С (К)	+32 (305)
Перегрев на всасывании, К	10
Переохлаждение, К	0
Холодопроизводительность Qo, кВт	100

Таблица 3. Исходные данные для анализа чиллера на режиме НТ

Table 3. Initial data for chiller analysis at LT

Температура кипения, °С (К)	-18 (255)
Температура конденсации, °С (К)	+45 (318)
Температура окружающей среды Tос, °С (К)	+32 (305)
Перегрев на всасывании, К	10
Переохлаждение, К	0
Холодопроизводительность Qo, кВт	100

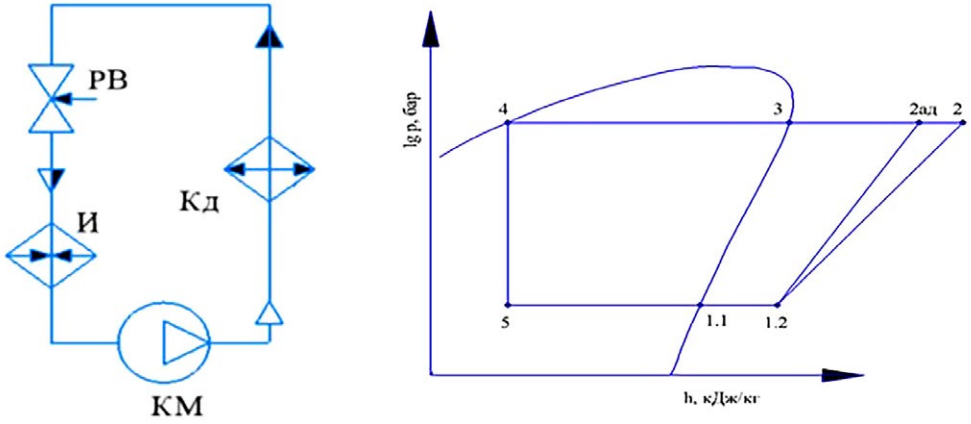

Рис. 1. Принципиальная схема цикла. КМ — компрессор, Кд — конденсатор, И — испаритель, РВ — регулирующий клапан.
Fig. 1. Circuit diagram of the cycle. KM — compressor, Prz — condenser, I — evaporator, RV — control valve.

- необходимая удельная работа для генерации холода

$$l_{min} = q_o \times \frac{T_{ос} - T_п}{T_п} \quad (4)$$

- адиабатная работа сжатия

$$l_{ад} = h_{2ад} - h_{1.2} \quad (5)$$

- действительная затрачиваемая удельная работа сжатия

$$l_{сж} = q_{кд} - q_o = h_2 - h_4 - (h_{1.2} - h_5) = \frac{l_{ад}}{\eta_{ад}} \quad (6)$$

- степень термодинамического совершенства

$$\eta_{терм} = \frac{l_{min}}{l_{сж}} \quad (7)$$

- холодильный коэффициент при адиабатном процессе сжатия

$$\varepsilon_{ад} = \frac{q_o}{l_{ад}} \quad (8)$$

- действительное значение холодильного коэффициента

$$\varepsilon_д = \frac{q_o}{l_{сж}} \quad (9)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе складываются из суммы минимально необходимых работ для компенсации производства энтропии при охлаждении паров хладагента от температуры нагнетания до температуры насыщения $\Delta l_{пк}$, конденсации паров хладагента в конденсаторе $\Delta l_{кк}$:

$$\Delta l_{кд} = \Delta l_{пк} + \Delta l_{кк}, \quad (10)$$

где

$$\Delta l_{пк} = (h_{2ад} - h_3) - T_{ос} \times (s_{2ад} - s_3) \quad (11)$$

$$\Delta l_{кк} = T_{ос} \times (h_3 - h_4) \times \left(\frac{1}{T_{ос}} - \frac{1}{T_к} \right) \quad (12)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании:

$$\Delta l_{др} = T_{ос} \times (s_5 - s_4) \quad (13)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при передаче теплоты от охлаждаемого объекта в цикле при средней температуре воздуха в потребителях (кипение жидкого хладагента):

$$\Delta l_{и.кип} = (h_{1.1} - h_4) \times T_{ос} \times \frac{T_п - T_o}{T_o \times T_п} \quad (14)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при передаче теплоты от охлаждаемого объекта в цикле при средней температуре воздуха в потребителях (перегрев хладагента в испарителе):

$$\Delta l_{и.пер} = T_п \times (s_{1.2} - s_{1.1}) - (h_{1.2} - h_{1.1}) \quad (15)$$

Общие необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе:

$$\Delta l_и = \Delta l_{и.кип} + \Delta l_{и.пер} \quad (16)$$

Суммируя величины необходимых удельных затрат работ для компенсации производства энтропии во всех элементах холодильной машины, находим расчетную величину адиабатной работы сжатия:

$$l_{ад.р} = l_{min} + \Delta l_{кд} + \Delta l_{др} + \Delta l_{и} \quad (17)$$

Энергетические потери в компрессоре:

$$\Delta l_{км} = l_{сж} - l_{ад.р} \quad (18)$$

Расчетная работа сжатия:

$$l_{сж.р} = l_{ад.р} + \Delta l_{км} \quad (19)$$

Для сравнения потерь в элементах холодильной установки при использовании разных хладагентов целесообразно использовать потери мощности, определяемые по следующей зависимости:

$$\Delta N_i = l_i \times G \quad (20)$$

Результаты анализа приведены на рис. 2, рис. 3, рис. 4 и в табл. 4, табл. 5, табл. 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 4, табл. 5, табл. 6 приведены значения показателей эффективности при использовании рассматриваемых хладагентов на разных температурных уровнях, на рис. 2, рис. 3, рис. 4 приведены значения распределения потерь мощности по элементам системы для разных температурных уровней.

ОБСУЖДЕНИЕ

Природный хладагент R1270 обладает более высокими показателями эффективности по сравнению с традиционно используемыми хладагентами R410A, R134a и R404A. Значения холодильного коэффициента при адиабатном сжатии выше на 9,46% по сравнению с R404A, на 8,21% по сравнению с R410A, ниже на 3,55% по сравнению с R134a для режима ВТ. Значения холодильного коэффициента при адиабатном сжатии выше на 11,51% по сравнению с R404A, на 8,66% по сравнению с R410A, ниже на 2,93% по сравнению с R134a для режима СТ. Значения холодильного коэффициента при адиабатном сжатии выше на 15,8% по сравнению с R404A, на 9,26% по сравнению с R410A, ниже на 1,82% по сравнению с R134a для установки с температурой кипения -25°C.

Природный хладагент R1270 относится к Группе 3 — взрывоопасные и легковоспламеняемые холодильные агенты с нижней границей воспламеняемости ниже 3,5% по объему (ГОСТ 12.2.233-2012(ISO 5149:1993)) и к Группе А3 — хладагенты с низкой токсичностью и высокой горючестью (ГОСТ 34891.1-2022). В качестве мер безопасности для работы с данным хладагентом следует применять специальные материалы (например, нельзя использовать EPDM и каучуки для уплотнений, не допускается применение нержавеющей стали и соединений сталь-латунь); не допускать утечки хладагента в местах, где быть контакт с электрокомпонентами, которые могут быть источником воспламенения; лопасти и корпус должны быть

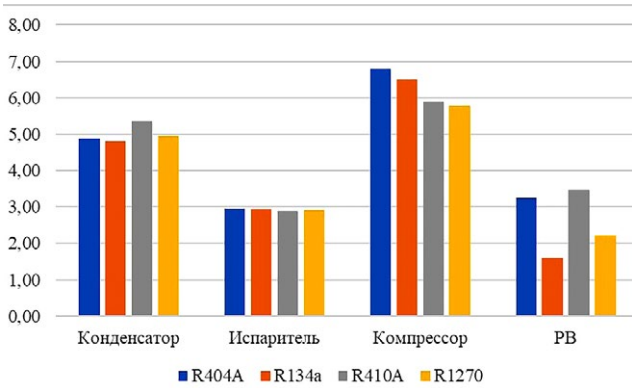

Рис. 2. Распределение потерь мощности по элементам чиллера на режиме ВТ, кВт.
Fig. 2. Distribution of power losses in chiller elements at HT, kW.

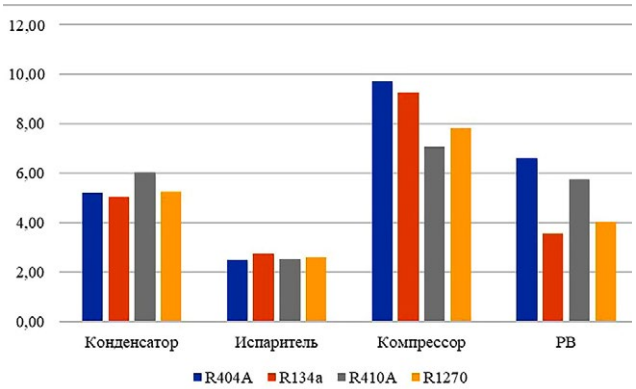

Рис. 3. Распределение потерь мощности по элементам чиллера на режиме СТ, кВт.
Fig. 3. Distribution of power losses in chiller elements at MT, kW.

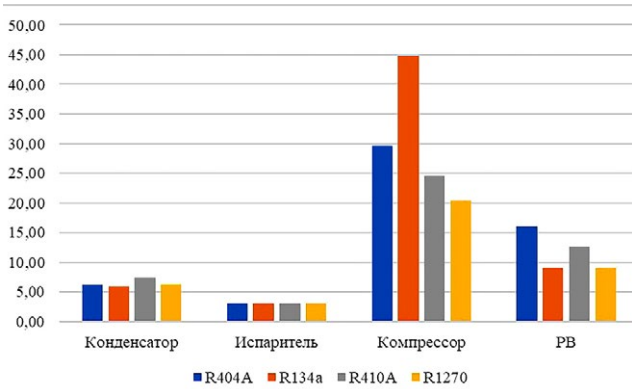

Рис. 4. Распределение потерь мощности по элементам чиллера на режиме НТ, кВт.
Fig. 4. Distribution of power losses in chiller elements at LT, kW.

выполнены из искробезопасных материалов; необходимо проводить регулярное обучение персонала; при заправке шланги должны быть зафиксированы, предприняты меры для снижения утечек, материалы, способные образовывать искры, должны быть удалены из места заправки;

Таблица 4. Показатели эффективности на режиме ВТ
Table 4. Performance chiller indicators at HT

	R404A	R134a	R410A	R1270
Степень термодинамического совершенства, %	14,54	16,16	15,61	16,52
Холодильный коэффициент при адиабатном сжатии	7,08	8,09	7,17	7,82
Действительный холодильный коэффициент	4,78	5,31	5,13	5,43
Температура нагнетания при действительном сжатии, °С	64,34	65,3	76,77	69,17

Таблица 5. Показатели эффективности чиллера на режиме СТ
Table 5. Performance chiller indicators at MT

	R404A	R134a	R410A	R1270
Степень термодинамического совершенства, %	24,99	28,22	28,11	29,11
Холодильный коэффициент при адиабатном сжатии	4,51	5,24	4,65	5,09
Действительный холодильный коэффициент	3,14	3,54	3,53	3,65
Температура нагнетания при действительном сжатии, °С	67,42	69,65	83,92	74,74

Таблица 6. Показатели эффективности чиллера на режиме НТ
Table 6. Performance chiller indicators at LT

	R404A	R134a	R410A	R1270
Степень термодинамического совершенства, %	23,39	21,06	26,54	29,97
Холодильный коэффициент при адиабатном сжатии	2,40	2,90	2,58	2,85
Действительный холодильный коэффициент	1,41	1,27	1,60	1,80
Температура нагнетания при действительном сжатии, °С	84,63	114,63	116,94	96,84

необходимо использовать специальные места хранения хладагентов; необходимо использовать средства индивидуальной защиты и портативные газовые анализаторы.

Более низкие показатели эффективности для R134a объясняются низкими значениями адиабатного КПД компрессора, обеспечивающему заданную холодопроизводительность. Значения холодильного коэффициента при действительном сжатии выше на 11,97% по сравнению с R404A, на 5,48% по сравнению с R410A, на 2,15% по сравнению с R134a для режима ВТ. Значения холодильного коэффициента при действительном сжатии выше на 14,13% по сравнению с R404A, на 3,41% по сравнению с R410A, на 3,04% по сравнению с R134a для режима СТ. Значения холодильного коэффициента при действительном сжатии выше на 21,95% по сравнению с R404A, на 11,44% по сравнению с R410A, на 29,73% по сравнению с R134a для установки с температурой кипения -25°С.

На режиме ВТ высокие показатели степени термодинамического совершенства получены для чиллеров с хладагентом R1270 — на 11,97% данный показатель выше, чем у чиллера с хладагентом R404A, на 2,15% чем у чиллера с хладагентом R134a и на 5,48% выше, чем у чиллера с хладагентом R410A. На режиме СТ чиллер с хладагентом R1270 продемонстрировал лучшие показатели степени термодинамического совершенства — на 14,13% данный показатель выше, чем у чиллера с хладагентом R404A, на 3,04% чем у чиллера с хладагентом R134a и на 3,41% выше, чем у чиллера с хладагентом R410A. На режиме НТ чиллер с хладагентом R1270 продемонстрировал также лучшие показатели степени термодинамического совершенства — на 21,95% данный показатель выше, чем у чиллера с хладагентом R404A, на 29,73% чем у чиллера с хладагентом R134a и на 11,44% выше, чем у чиллера с хладагентом R410A.

Применение хладагентом R410A и R134a при работе на НТ режиме ограничивается температурой нагнетания при действительном процессе сжатия — для R410A она составляет 116,94°С, для R134a — 114,63°С, что снижает срок службы оборудования. Самую низкую температуру при действительном сжатии 84,63°С можно получить, используя хладагент R404A. Температура нагнетания при использовании хладагента, несмотря на высокие показатели эффективности, составляет 96,84°С, что является достаточно высокой величиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выборе хладагента для чиллер следует ориентироваться не только на показатели эффективности, но и на эксплуатационные показатели, такие, как температура нагнетания. Углеводороды служат хорошими хладагентами для различных холодильных установок

DOI: https://doi.org/10.17816/RF632560

и системы кондиционирования [4]. А также имеют меньшую цену и доступность по сравнению с аналогами. Использование углеводородных хладагентов растет из-за их низкого воздействия на окружающую среду, выдающихся термодинамических характеристик и нетоксичности. Недостаток углеводородов, такой как воспламеняемость, можно преодолеть, используя системы минимальной заправки и тщательного обнаружения утечек Воспламеняемость также может быть снижена при использовании углеводородов в смесях, в том числе и с углекислым газом [5].

В долгосрочной перспективе применение углеводородов в качестве хладагентов является перспективным, поскольку применение и производство синтетических хладагентов (хладонов) будет сокращаться согласно графику, определяемым Кигалийской поправкой, что увеличит их стоимость. Углеводородных хладагентов такие ограничения не коснутся.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. М. С. Талызин — проведение расчетов, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание и редактирование текста статьи. А. В. Сколов — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. M.S. Talyzin — calculations, literature review, collection and analysis of literary sources, writing and editing of the text of the article. A. V. Skolov — literature review, collection and analysis of literary sources, writing of the article.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ / LEGEND

p	давление	$\varepsilon_{ад}$	холодильный коэффициент адиабатный
$\varepsilon_{д}$	холодильный коэффициент действительный	$\eta_{терм}$	степень термодинамического совершенства
s	удельная энтропия, кДж/(кг×К)	h	удельная энтальпия, кДж/кг
$T_{о}$	температура кипения хладагента в испарителе, К	$t_{о}$	температура кипения хладагента в испарителе, °С
$T_{к}$	температура конденсации хладагента, К	$t_{к}$	температура конденсации хладагента, °С
$T_{вх}$	температура хладоносителя на входе в испаритель, К	$T_{вых}$	температура хладоносителя на выходе из испарителя, К
$\Delta T_{пер_исп}$	перегрев в испарителе, К	$\Delta T_{пер_вс}$	перегрев на всасывании в компрессор, К
$\Delta T_{по}$	переохлаждение жидкого хладагента, К	$T_{н}$	температура нагнетания компрессора, К
$t_{н}$	температура нагнетания компрессора, °С	$\eta_{ад}$	адиабатный КПД компрессора, %
$T_{п}$	температура в охлаждаемом объеме, К	$t_{п}$	температура в охлаждаемом объеме, °С
$T_{ос}$	температура окружающей среды, К	$t_{ос}$	температура окружающей среды, °С
$q_{о}$	удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг	l_{min}	минимальная удельная работа, необходимая для генерации холода, кДж/кг
$l_{ад}$	адиабатная работа сжатия, кДж/кг	$l_{сж}$	действительная работа сжатия, кДж/кг
$\Delta l_{км}$	энергетические потери в компрессоре	$\Delta l_{и}$	энергетические потери в испарителе
$\Delta l_{кд}$	энергетические потери в конденсаторе	$\Delta l_{др}$	энергетические потери в дросселирующем устройстве
ВТ	температуры хладоносителя (вход в испаритель / выход из испарителя): плюс 26°С / плюс 20°С	СТ	температуры хладоносителя (вход в испаритель / выход из испарителя): плюс 12°С / плюс 7°С
НТ	температуры хладоносителя (вход в испаритель / выход из испарителя): минус 10°С / минус 13°С		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. Talyzin M.S., Ponomarev V.G. Application of nature refrigerants in refrigeration plants // Chemical and Petroleum Engineering. Vol. 58, N. 11–12. doi: 10.1007/s10556-023-01197-2
3. Талызин М.С. Альтернативные хладагенты — проблемы и перспективы // Молочная промышленность. 2021. № 12. С. 36–37.
4. Shishov V.V., Talyzin M.S. Efficiency of refrigeration equipment on natural refrigerants // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Vol. 56, N. 5–6. P. 385–392.
5. Yelishala S.C., Kannaiyan K., Wang Z., et al. Thermodynamic Study on Blends of Hydrocarbons and Carbon Dioxide as Zeotropic Refrigerants // Energy Resour. Technol. 2020. Vol. 142, N. 8. doi: 10.1115/1.4045930

REFERENCES

1. Arkharov AM. *Fundamentals of cryology. Entropy-statistical analysis of low-temperature systems.* Moscow: MGTU im NE Baumana. 2014. (In Russ).
2. Talyzin MS, Ponomarev VG. Application of nature refrigerants in refrigeration plants. Chemical and Petroleum Engineering. 58;11–12. doi: 10.1007/s10556-023-01197-2
3. Talyzin MS. Alternative Refrigerants - Challenges and Prospects. Milk Industry. 2021;12:36–37. (In Russ).
4. Shishov VV, Talyzin MS. Efficiency of refrigeration equipment on natural refrigerants // Chemical and Petroleum Engineering. 2020;56(5–6):385–392.
5. Yelishala SC, Kannaiyan K, Wang Z, et al. Thermodynamic Study on Blends of Hydrocarbons and Carbon Dioxide as Zeotropic Refrigerants. *Energy Resour. Technol.* 2020;142(8). https://doi.org/10.1115/1.4045930

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*** Талызин Максим Сергеевич,**
канд. техн. наук, академик МАХ;
адрес: Российская Федерация, Москва, 105005,
2-я Бауманская, 5;
ORCID: 0000-0001-7244-1946;
eLibrary SPIN: 6524-3085;
e-mail: talyzin_maxim@mail.ru

Сколов Андрей Викторович,
e-mail: skolov@lekmaholod.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Talyzin Maxim Sergrrvich,**
Academician of IAR, Cand. Sci. (Eng.);
address: 5 2-nd Baumanskaya street, 105005 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-7244-1946;
eLibrary SPIN: 6524-3085;
e-mail: talyzin_maxim@mail.ru

Skolov Andrey Viktorovich,
e-mail: skolov@lekmaholod.ru