

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF633019>

Низкомолекулярные эфиры в качестве гибридных сред для сублимационных холодильных контуров R744

Joachim Germanus¹, Steffen Feja¹, Margrit Junk¹, Peter Rölling¹, Jens Kubitschke²¹ Institute of Air Handling and Refrigeration gGmbH, Dresden, Germany;² OQ Chemicals GmbH, Monheim am Rhein, Germany

АННОТАЦИЯ

До сих пор для температурного диапазона между $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ использовались в основном такие хладагенты, как трифторметан (R23) или углеводороды (например, этан или этилен). Поэтапный отказ от фторированных хладагентов с высоким потенциалом глобального потепления (ПГП) и воспламеняемость углеводородов, применяемых в качестве хладагентов, требуют новых технических решений.

В статье обсуждается применение фазового перехода диоксида углерода из твердого состояния в газообразное при низкотемпературном охлаждении. К сожалению, тройная точка CO_2 не допускает фазового перехода между жидкостью и газом ниже $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, достичь более низких температур можно только с помощью сублимации. Однако, для технической реализации этого решения требуются новые концепции.

Если удастся использовать сублимацию CO_2 для охлаждения, то у нас появится альтернатива в виде невоспламеняющегося, экологически чистого, низкотемпературного хладагента для температурного диапазона до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для этого необходимо использовать новые смазочные материалы для компрессоров, которые служат теплоносителем при сублимации CO_2 в холодильном контуре. Поэтому продолжаются поиски подходящих веществ, которые можно было бы использовать в этом случае. Были изучены некоторые подходящие соединения с точки зрения их термодинамических и трибологических свойств, а также их совместимость с используемыми материалами. Приведены результаты экспериментов, показывающие их возможность использования в холодильных системах с сублимацией CO_2 .

Ключевые слова: охлаждение, углекислый газ, сублимация, низкая температура.

Настоящая статья представляет собой перевод статьи Germanus J, Feja S, Junk M, Rölling P, Kubitschke J.

Low molecular weight esters as hybrid fluids for R744 sublimation cooling circuits. In: Proceedings of the 9th IIR

Conference on the Ammonia and CO_2 Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021. DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0013

Публикуется с разрешения правообладателя.

Как цитировать:

Germanus J., Feja S., Junk M., Rölling P., Kubitschke J. Низкомолекулярные эфиры в качестве гибридных сред для сублимационных холодильных контуров R744 // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 2. С. 99–107. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF633019>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF633019>

Low molecular weight esters as hybrid fluids for R744 sublimation cooling circuits

Joachim Germanus¹, Steffen Feja¹, Margrit Junk¹, Peter Rölling¹, Jens Kubitschke²

¹ Institute of Air Handling and Refrigeration gGmbH, Dresden, Germany;

² OQ Chemicals GmbH, Monheim am Rhein, Germany

ABSTRACT

Up to now, for the temperature range between -50 °C and -90 °C mainly refrigerants like trifluoro methane (R23) or hydrocarbons (e.g. ethane or ethylene) are used. The phase-out of the fluorinated refrigerants with high GWP and the flammability of the hydrocarbons as refrigerants requires new technical solutions.

In the presentation, considerations are given regarding the application of the carbon dioxide phase change from solid to gaseous state for low temperature cooling. Unfortunately, the triple point of CO₂ does not allow a phase change between liquid and gas below -56 °C. Thus, lower temperatures are only possible by means of sublimation. However, this requires new concepts for their technical implementation.

CO₂ gives us an alternative as a non-flammable, environmentally friendly, low temperature refrigerant for a temperature range down to -80 °C, if we succeed in using the sublimation of the CO₂ for cooling applications. This requires the use of new compressor lubricants, which also serve as a heat transfer fluid during the sublimation of the CO₂ in a refrigeration circuit. For this reason, we looked for suitable substances that could be used. We examined some suitable compounds with regard to their thermodynamic and tribological properties as well as material compatibility.

Experimental results will be given that show the capability for the use in CO₂-sublimation cooling systems.

Keywords: refrigeration, carbon dioxide, sublimation, low temperature.

This article is a translation of the article by Germanus J, Feja S, Junk M, Rölling P, Kubitschke J. Low molecular weight esters as hybrid fluids for R744 sublimation cooling circuits. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021. DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0013

Published with the permission of the copyright holder.

To cite this article:

Germanus J, Feja S, Junk M, Rölling P, Kubitschke J. Low molecular weight esters as hybrid fluids for R744 sublimation cooling circuits. *Refrigeration Technology*. 2023;112(2):99–107. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF633019>

Received: 30.05.2024

Accepted: 30.05.2024

Published online: 17.06.2024

1. ВВЕДЕНИЕ

С началом поставок первых вакцин против Covid-19 в конце 2020 года стало очевидно, что диапазон охлаждения от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ играет чрезвычайно важную роль в человеческом обществе. Кроме того, существует большое количество других областей его применения. В качестве примера можно привести хранение и сублимационную сушку пищевых и фармацевтических продуктов, камеры для моделирования окружающей среды и лабораторные исследования. Кроме того, такие низкие температуры могут применяться в охлаждении электронных устройств (например, радиолокационных систем) и в военных целях (например, экспериментальное определение баллистической траектории переохлажденных снарядов).

Наиболее распространенной технологией для достижения указанного диапазона температур является двухступенчатый каскадный парокомпрессионный цикл с использованием двух различных хладагентов, термически связанных теплообменником, который работает как испаритель для хладагента верхней ступени каскада и конденсатор для нижней ступени каскада. В тех случаях, когда требуется использование невоспламеняющихся хладагентов, по-прежнему, используются фторированные хладагенты как в верхней, так и в нижней ступенях каскада. Лишь немногие хладагенты применимы для работы при температуре ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на ступени низкой температуры. Благодаря низкой нормальной температуре кипения (NBP) и благоприятным термодинамическим свойствам на нижней ступени каскада, в основном используются такие хладагенты, как R23 и R508 (азеотропная смесь R23 и R116). Однако, эти хладагенты вносят высокий прямой вклад в парниковый эффект (потенциал глобального потепления, ПГП). И R23, и R116 имеют очень высокое значение ПГП – 14 800 и 11 100, и очень большое время жизни в атмосфере [1].

В настоящей публикации описано возможное решение и разработка холодильной системы с низким ПГП в диапазоне температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для этого температурного диапазона доступность негорючих хладагентов с низким ПГП очень ограничена. К сожалению, в целевом диапазоне температур использование CO_2 в качестве хладагента в парокомпрессионной холодильной системе невозможно из-за перехода фазы твердое тело-газ ниже тройной точки при температуре $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 5,2 бар. Он имеет долгую историю применения с середины XIX века, но после 1950 года был полностью вытеснен из применения, освободив место для хладагентов, которые в то время были более эффективными. Сегодня CO_2 успешно возвращается в холодильную технику в различных областях применения [2]. CO_2 (R744) сильно отличается от других обычно используемых хладагентов. Его преимуществами являются, например, негорючесть, нетоксичность, в основном хорошие термодинамические

свойства и хорошая экологическая совместимость в качестве хладагента.

Сублимация CO_2 во вспомогательной жидкости может быть полезным и энергоэффективным способом использования CO_2 в замкнутых циклах охлаждения с более чем одной ступенью компрессора для низкотемпературных установок с температурой примерно до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Целью нашей работы было найти материал, который можно использовать в качестве смазки для компрессора и одновременно в качестве теплоносителя для охлаждающего контура сублимации CO_2 . Обычные смазочные материалы для компрессоров застывают при температуре сублимации CO_2 и не могут быть транспортированы обратно в компрессор.

В данной публикации приведены экспериментальные данные для отдельных потенциальных соединений, которые могут быть использованы в качестве гибридной среды для контура сублимации CO_2 .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для того, чтобы найти подходящее соединение, было синтезировано пять различных сложных эфиров при поддержке компаний OQ Chemicals GmbH и ChiroBlock GmbH. Эти сложные эфиры различаются по структуре и молекулярной массе. Основным требованием при их выборе была низкая температура замерзания не менее $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимальная применимая вязкость для смазки компрессора ($>5\text{ сСт}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Преимущественным свойством таких веществ считается высокая растворимость CO_2 при низких температурах, что приводит к снижению вязкости жидкости. Низкая вязкость жидкости при низких температурах благоприятно сказывается на переносе теплоты в холодильном контуре. Из-за отсутствия необходимых данных их пришлось измерять, в частности, термодинамические и трибологические свойства, данные о стабильности и совместимости материалов. Для всех исследований в рамках данной работы использовался CO_2 чистотой 4,5 (99,995% по объему) производства компании Westfalen AG.

2.1. Физические свойства

2.1.1. Растворимость в газах и давление паров

Газорастворимость CO_2 в сложных эфирах исследовали двумя независимыми методами. Первый из них – это метод, в котором газообразный CO_2 был растворен при давлении 1 бар (абс.) в сложных эфирах при различных температурах от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Исследования проводились в автоклаве. При достижении равновесия растворимости в автоклаве (постоянное давление) автоклав закрывали и гравиметрически определяли растворенный CO_2 . Результаты этого метода вместе с интерполированными кривыми (основанными на значениях давления пара) для эфира MFPO4 при 1, 3 и 5 бар показаны на рис. 1. MFPO означает зашифрованный синоним соответствующего эфира.

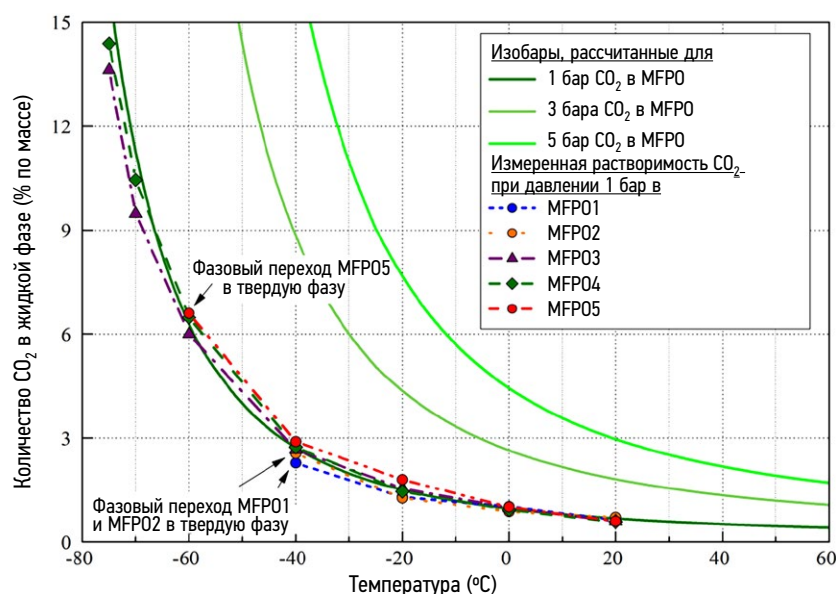


Рис. 1. Растворимость CO_2 в различных сложных эфирах при давлении 1 бар и расчетная растворимость при давлении 1, 3 и 5 бар.
Fig. 1. Solubility of CO_2 in different esters at 1 bar and calculated solubilities at 1, 3 and 5 bar.

Точные названия эфиров в данной публикации не приводятся из соображений конфиденциальности.

Три из пяти соединений показали температуру замерзания значительно выше -75°C . Только сложные эфиры MFP03 и MFP04 оставались жидкими во всем диапазоне температур до -75°C . Температура замерзания компонентов MFP01, MFP02 и MFP05 может быть определена путем повышения температуры в автоклаве выше заданной целевой температуры. Измерение температуры проводилось с помощью калиброванного датчика Pt100 (максимальная погрешность 0,05 K) производства компании Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH. Давление измерялось с помощью датчика 10 бар производства компании Baumer GmbH (максимальная погрешность 0,15% от полной шкалы).

Второй метод заключается в измерении давления пара предварительно перемешанных смесей CO_2 -эфиров с различной концентрацией. Смеси CO_2 -эфиров помещали в автоклав (объем $\sim 0,5$ л) для определения давления паров. Необходимое количество веществ взвешивали гравиметрически. Для быстрого установления фазового равновесия оба компонента смеси перемешивали в автоклаве с помощью магнитной мешалки. Температура в автоклаве регулировалась с помощью термостатической ванны. Температура в автоклаве измерялась с помощью калиброванного датчика Pt100. Для измерения кривой «давление-температура» каждую смесь, примерно по четыре образца, уравнивали при нескольких постоянных температурах. На рис. 2 показан сложный эфир MFP04, который был выбран для всех дальнейших исследований из-за его сравнительно наиболее выгодных свойств.

С помощью математической коррекции данные были интер- и экстраполированы и нормированы на изобары, изотермы, а также линии изоконцентрации. В пределах диапазона измерений погрешность составляет менее 3% от значений давления и менее 1% от значений концентрации (% по массе) (см. рис. 2). Неопределенность экстраполяции выше, но все же приемлема. Составы растворимости при каждом давлении могут быть определены путем подгонки данных равновесия (см. рис. 1). Данные для 1 бара совпадают с измеренными данными растворимости из первого метода. Можно предположить, что оба метода жизнеспособны для получения данных о растворимости и давлении при заданных температурах. В частности, измерение давления паров дает информацию о смешиваемости $\text{CO}_2(\text{г})$ и даже $\text{CO}_2(\text{ж})$ при экстраполяции. Точки пересечения кривых $p(T, x)$ с давлением насыщения CO_2 (твердым или жидким) представляют собой соответствующие температуры и составы смесей для кристаллизации CO_2 и образования богатой CO_2 жидкой фазы соответственно. Эти точки можно рассчитать очень точно. Эти данные используются на следующих рисунках для плотности и вязкости, чтобы представить свойства на границе смешиваемости.

2.1.2. Плотность

Плотность чистых эфиров и их смесей с CO_2 измеряли с помощью измерительной ячейки DMA HPM производства компании Anton Paar Germany GmbH. Принципы измерения с помощью этого прибора подробно описаны в работе Feja et al. [3]. Погрешность измерения плотности составляет менее 0,5%. На рисунке 3 представлены результаты экспериментов для смесей CO_2 -эфиров-MFP04

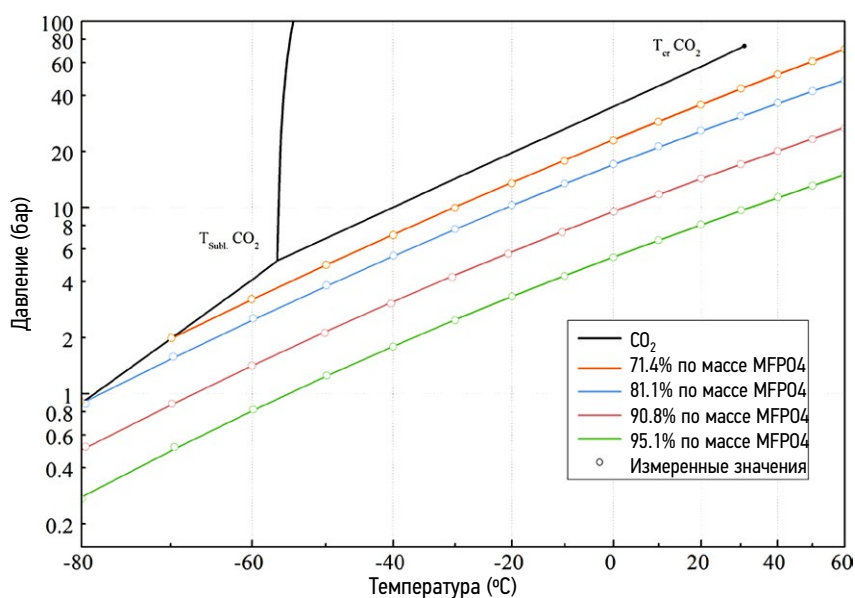


Рис. 2. Давление паров смеси CO_2 -эфира (MFP04).

Fig. 2. Vapor pressure of CO_2 -ester (MFP04)-mixtures.

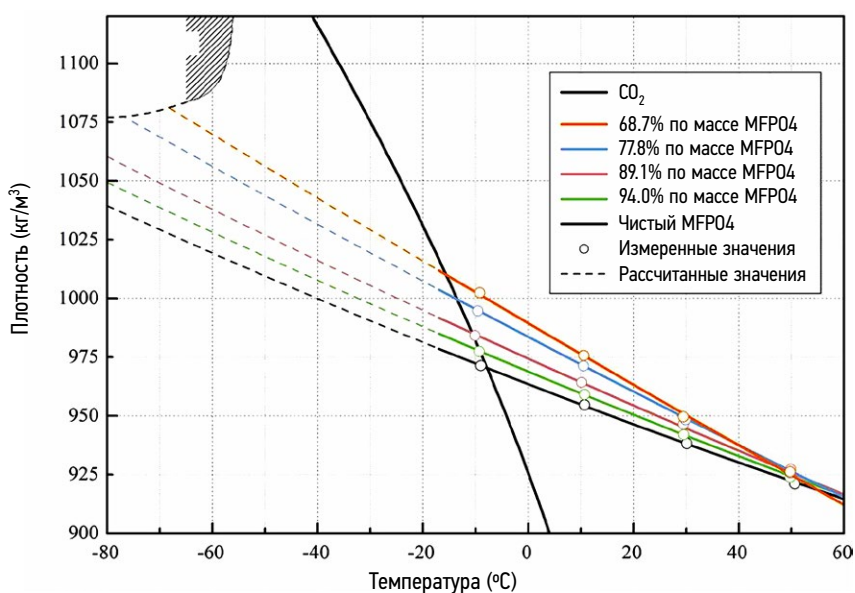


Рис. 3. Плотность смеси CO_2 -эфира (MFP04).

Fig. 3. Density of CO_2 -ester (MFP04)-mixtures.

в диапазоне температур от -10°C до $+50^\circ\text{C}$. Диапазон от -10°C до -80°C экстраполируется на основе измеренных данных. Экстраполированные кривые заканчиваются на границе смешиваемости в зависимости от концентрации CO_2 в смесях.

2.1.3. Вязкость

Измерение вязкости проводилось с помощью вискозиметра с колеблющимся поршнем. Измерения вязкости проводились в различных диапазонах вязкости в общем диапазоне от 0,2 до 5 000 сП. Процедура

измерения описана в ASTM D 7483-13a [6]. Температура регулируется с точностью до 0,05 К и измеряется с максимальным отклонением в 0,15 К. Вискозиметр калибруется с помощью калибровочных жидкостей, которые прослеживаются до национального стандарта вязкости (калибровка DKD или NIST). Предельное отклонение вязкости составляет 1% от полной шкалы используемого диапазона измерений или 3%, в зависимости от того, какое значение меньше. Сводная характеристика кинематической вязкости вместе с давлением пара (график Даниэля) показана на рис. 4.

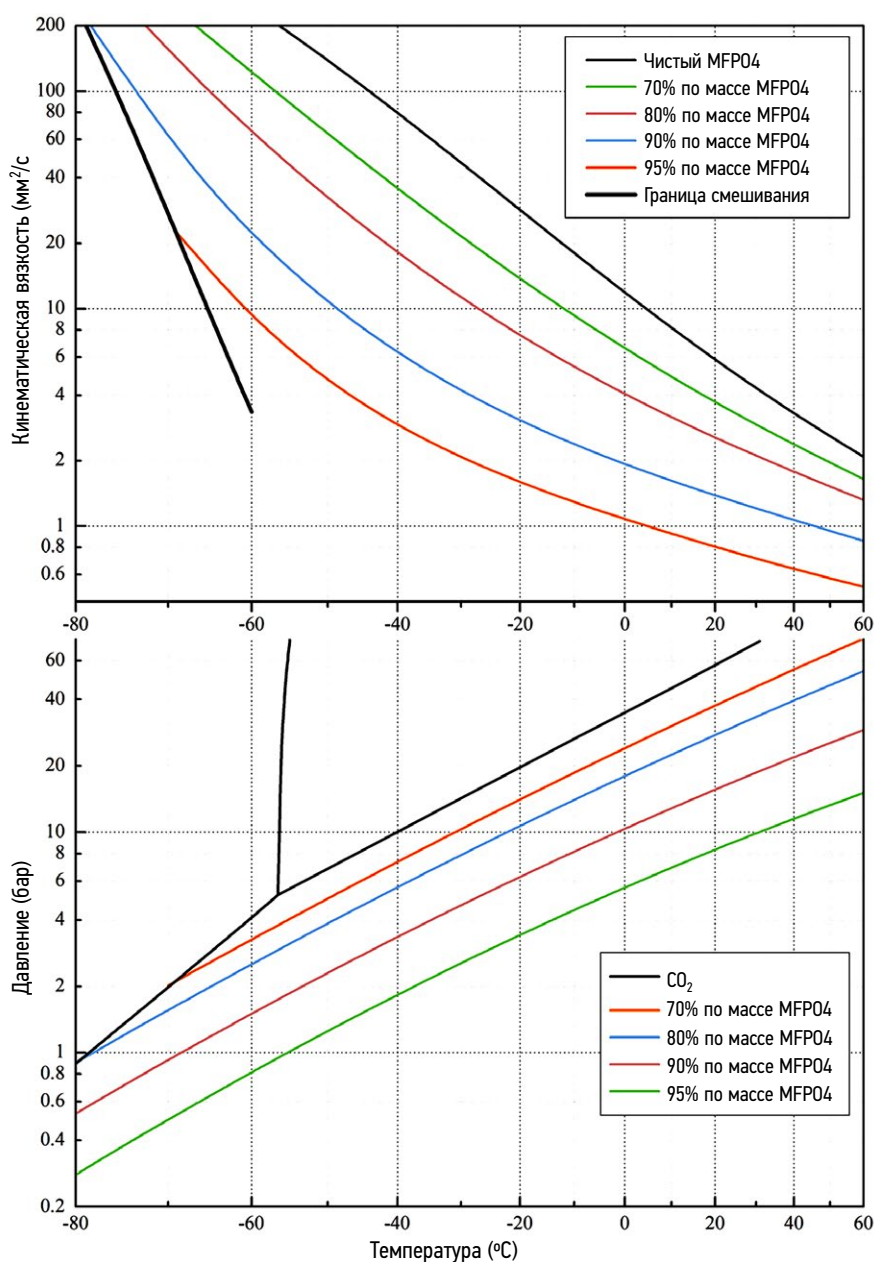


Рис. 4. График Даниэля смеси CO₂-эфира (MFP04).

Fig. 4. Daniel-Plot of CO₂-ester (MFP04)-mixtures.

2.2. Трибологические характеристики

Исследования проводились на модифицированной испытательной установке для испытаний на износ производства компании Almen-Wieland, позволяющей проводить испытания в атмосфере хладагента [5]. Для проведения низкотемпературных испытаний испытательная камера была изолирована, чтобы обеспечить начальную температуру -20 °C для проведения эксперимента. Во время испытаний два неподвижных полуподшипника с геометрией Almen-Wieland или Falex (см. рис. 5) гидравлически прижимаются к испытательному штифту, вращающемуся горизонтально в жидкости со скоростью 200 мин⁻¹. Оставшийся объем испытательной ячейки заполняется

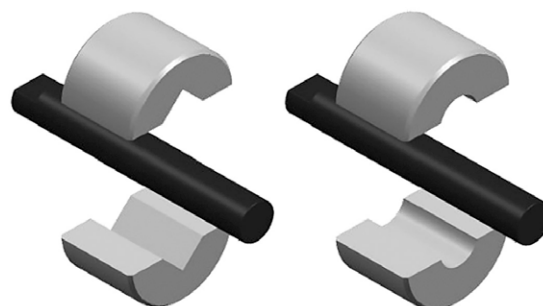


Рис. 5. Полуподшипники с геометрией Falex (слева) и полуподшипники Almen-Wieland (справа) и контрольный штифт.

Fig. 5. Half bearings with Falex geometry (left) and Almen-Wieland half bearings (right) and test pin.

хладагентом под определенным давлением. При проведении испытаний, представленных в данной статье, давление CO₂ было установлено на уровне 2 бар.

Для определения несущей способности жидкостей необходимо определить нагрузку разрушения при избыточном давлении Falex (нагрузку заедания) смазочного материала. Это значение указывает на разрушение смазочной пленки и трение материалов. При последующем практическом использовании необходимо предусмотреть соответствующие ограничения по нагрузке. Во время эксперимента приложенная нагрузка постоянно увеличивается на 2 кН/мин до тех пор, пока не произойдет заклинивание штифта и полуподшипника. Нагрузка разрушения при экстремальном давлении определяется как наибольшая нагрузка (испытательное усилие) до разрушения, т.е. поломки испытуемого штифта. Этот параметр был определен с помощью полуподшипников типа Falex.

Коэффициент трения μ измеряется путем приложения постоянной нагрузки в 1 кН в течение определенного времени испытания с использованием полуподшипников Alpen-Wieland. Нагрузка прикладывается со скоростью 2 кН/мин, время испытания составляет 1 ч. Средний коэффициент трения рассчитывается по значениям трения, зарегистрированным во время испытания без учета первых 15 мин.

Во время испытаний под избыточным давлением температура в зоне контакта полуподшипников

и испытательного штифта повысилась до 150 °С. При испытаниях на трение температура повышалась с -20 °С в начале до примерно 1 °С.

Если сравнивать со стандартной холодильной системой на базе полиоловых эфиров и CO₂, то разрушающая нагрузка при избыточном давлении смеси MFPO4 — CO₂ выше. Коэффициент трения выше по сравнению со стандартными смазочными материалами. Трибологические исследования с другими низкомолекулярными эфирами подтверждают эти тенденции.

В целом, по результатам трибологических испытаний, эфир MFPO4 обладает хорошими смазывающими свойствами. Машинные испытания в компрессорах станут следующим шагом в квалификации гибридной жидкости.

2.3. Термохимическая стабильность

Термохимическая стабильность системы MFPO4 — CO₂ была проверена с использованием модифицированного испытания в герметичной трубке на основе рекомендаций ASHRAE 97 [4]. В соответствии с этим стандартом открытые стеклянные пробирки помещают в герметичный автоклав из нержавеющей стали. Преимущество указанного метода заключается в лучшей стабильности давления в испытательной системе и большем количестве смазки и хладагента, доступных для анализа после старения. Всего в автоклав помещалось 10 стеклянных

Таблица 1. Трибологические свойства смеси MFPO4 — CO₂; средние значения и стандартное отклонение
Table 1. Tribological properties of MFPO4 — CO₂ mixtures; averages and standard deviation

	MFPO4 — CO ₂	Полиэозфир — CO ₂ *
Нагрузка разрушения при избыточном давлении	9.9 ± 0.4 кН	6.5 ± 0.7 кН
Коэффициент трения	0.12 ± 0.01	0.05 ± 0.01

* среднее значение всех трибологических измерений с этими рабочими жидкостями, проведенных в ILK

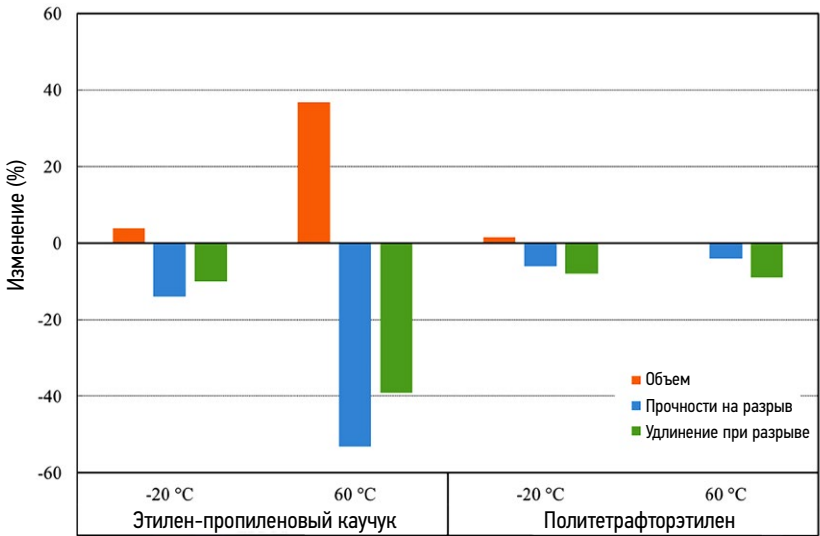


Рис. 6. Результаты старения этилен-пропиленового каучука и политетрафторэтилена в среде MFPO4 и CO₂.
Fig. 6. Results of aging EPDM and PTFE with MFPO4 and CO₂.

пробирок, каждая из которых была заполнена примерно сложным эфиром MFPO4 весом 15 г. В 7 из них были размещены материалы-катализатор, по одной полосе меди, стали и алюминия в каждой. После помещения стеклянных пробирок в сосуд из нержавеющей стали под давлением его вакуумировали и заполнили CO_2 , в результате чего целевое давление во время выдержки составило 12 бар. Испытание проводилось в течение 168 ч при температуре 120 °C.

После старения стальные и алюминиевые полоски не показали никаких видимых изменений. Медные полоски имели металлический блеск, но были слегка потускневшими. Кроме того, не наблюдалось значительных изменений общего кислотного числа и вязкости MFPO4. Исследование инфракрасного спектра жидкости не выявило различий между новой и состаренной жидкостью.

2.4. Совместимость материалов — металлы и полимеры

Для оценки совместимости потенциальных материалов для использования в контуре сублимационного охлаждения были проведены испытания на старение вместе с MFPO4 и CO_2 . В качестве примера представлены результаты для одного эластомерного уплотнительного материала (этилен-пропиленовый каучук) и одного полимера (политетрафторэтилен). Выбор обоих материалов обусловлен тем, что они являются уплотнительными материалами, которые подходят для эфиров и CO_2 . Образцы материала были предоставлены компанией Freudenberg Sealing Technologies GmbH.

Выдержку проводили в сосудах высокого давления (автоклавах) из нержавеющей стали в течение 168 ч при температурах -20 °C и 60 °C. В процессе старения образцы покрывали MFPO4. Давление CO_2 в автоклаве при заданной температуре составляло 10 бар. До и после старения определяли объем, твердость и прочность образцов на растяжение.

Изменение свойств этилен-пропиленового каучука было более выражено после старения при 60 °C по сравнению со старением при -20 °C. Как правило, увеличение объема до 10% и снижение прочности на разрыв или удлинение при разрыве на 50% считаются допустимыми пределами. При -20 °C этилен-пропиленовый каучук удовлетворяет этим требованиям, при 60 °C материал разрушается. Необходимо найти более подходящий уплотнительный материал.

Политетрафторэтилен демонстрирует лишь незначительные изменения в объеме и умеренное снижение свойств растяжения, независимо от температуры испытания.

3. ВЫВОДЫ И ПРОГНОЗ

В ходе исследований было обнаружено сложноэфирное соединение, которое, по-видимому, подходит в качестве смазки компрессора и теплоносителя для контуров

сублимационного охлаждения на базе CO_2 . Полученные результаты свидетельствуют о том, что сложный эфир MFPO4 можно использовать в цикле сублимационного охлаждения. Это вещество обладает выгодными термодинамическими и трибологическими свойствами по сравнению с другими исследованными жидкостями. Жидкостная система (смесь сложного эфира MFPO4 с CO_2) обеспечивает низкую температуру применения примерно до -75 °C. Эта температура ограничена температурой плавления сложного эфира, а также пределами смешиваемости сложного эфира с углекислым газом. На следующем этапе проводится испытание машины, чтобы проверить, как работает сложный эфир в практических условиях. Если результаты окажутся положительными, можно будет спроектировать и построить первый цикл сублимационного охлаждения. Однако, для подготовки к выходу на рынок необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за финансовую поддержку данного исследования со стороны Федерального министерства экономики и технологий Германии. Регистрационный номер проекта FuE MF180114 "Hybrid-Fluid für CO_2 -Sublimations-Kältekreislauf".

СОКРАЩЕНИЯ

- p — давление (бар) — абсолютное
- R — молярная газовая постоянная (8,314472 Дж×моль⁻¹×К⁻¹)
- T — температура (°C)
- V — молярный объем (м³×моль⁻¹)
- c — массовая концентрация (% по массе)
- μ — коэффициент трения
- EPDM — этилен, пропилен, диеновый мономер, каучук
- POE — полиэфир (масло)
- ПТФЭ — политетрафторэтилен
- MFPO — синоним используемых сложных эфиров
- ПГП — Потенциал глобального потепления
- ILK — Институт охлаждения и обработки воздуха
- $\text{CO}_2(m)$ — углекислый газ в твердом состоянии
- $\text{CO}_2(ж)$ — углекислый газ в жидком состоянии

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Настоящая статья представляет собой перевод статьи Germanus J, Feja S, Junk M, Rilling P, Kubitschke J. Low molecular weight esters as hybrid fluids for R744 sublimation cooling circuits. In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO_2 Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021. DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0013 Публикуется с разрешения правообладателя.

ADDITIONAL INFORMATION

This article is a translation of the article by Germanus J, Feja S, Junk M, Rölling P, Kubitschke J. Low molecular weight esters as hybrid fluids for R744 sublimation cooling circuits.

In: Proceedings of the 9th IIR Conference on the Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies. Ohrid: IIF/IIR, 2021.

DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0013

Published with the permission of the copyright holder.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 659–740.
2. Ciconkov R. Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 86. P. 441–448.
3. Feja S., Hanzelmann C. Experimental studies of thermodynamic properties of R744-oilmixtures up to 140 °C and 150 bar //

International Journal of Refrigeration. 2015. Vol. 60. P. 135–141. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.07.018.

4. ANSI/ASHRAE 97-2007. Sealed Glass Tube Method to Test the Chemical Stability of Materials for Use within Refrigerant Systems. ASHRAE, 2007.

5. Junk M. Tribologische Charakterisierung von Öl-Kältemittel-Gemischen // *Tribologie + Schmierungstechnik*. 2010. Vol. 57, N. 6. P. 49–52.

6. ASTM D 7483-13a. Standard Test Method for Determination of Dynamic Viscosity and Derived Kinematic Viscosity of Liquids by Oscillating Piston Viscometer, 2013. iTeh Standards, 2020.

REFERENCES

1. Myhre G, Shindell D, Bréon F-M, et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 659–740.
2. Ciconkov R. Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions. *International Journal of Refrigeration*. 2018;86:441–448.
3. Feja S, Hanzelmann C. Experimental studies of thermodynamic properties of R744-oilmixtures up to 140 °C and 150 bar. *International*

Journal of Refrigeration. 2015;60:135–141. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.07.018.

4. ANSI/ASHRAE 97-2007. Sealed Glass Tube Method to Test the Chemical Stability of Materials for Use within Refrigerant Systems. ASHRAE, 2007.

5. Junk M. Tribologische Charakterisierung von Öl-Kältemittel-Gemischen. *Tribologie + Schmierungstechnik*. 2010;57(6):49–52.

6. ASTM D 7483-13a. Standard Test Method for Determination of Dynamic Viscosity and Derived Kinematic Viscosity of Liquids by Oscillating Piston Viscometer, 2013. iTeh Standards, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

* Germanus Joachim,

адрес: Германия, D-01309 Dresden;

e-mail: info@ilkdresden.de

Feja Steffen,

адрес: Германия, D-01309 Dresden;

e-mail: info@ilkdresden.de

Junk Margrit,

адрес: Германия, D-01309 Dresden;

e-mail: info@ilkdresden.de

Rölling Peter,

адрес: Германия, D-01309 Dresden;

e-mail: info@ilkdresden.de

Kubitschke Jens,

адрес: Германия, D-40789 Monheim am Rhein;

e-mail: jens.kubitschke@oq.com

AUTHORS' INFO

* Joachim Germanus,

address: D-01309 Dresden, Germany;

e-mail: info@ilkdresden.de

Steffen Feja,

address: D-01309 Dresden, Germany;

e-mail: info@ilkdresden.de

Margrit Junk,

address: D-01309 Dresden, Germany;

e-mail: info@ilkdresden.de

Peter Rölling,

address: D-01309 Dresden, Germany;

e-mail: info@ilkdresden.de

Jens Kubitschke,

address: D-40789 Monheim am Rhein, Germany;

e-mail: jens.kubitschke@oq.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author