

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551799>

Смесь диоксида углерода и диметилового эфира в качестве хладагента для наземной системы кондиционирования воздуха

А.А. Жаров, С.А. Гаранов, М.С. Талызин, Н.А. Ковальчук

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Выбор хладагентов для современных систем кондиционирования воздуха (СКВ) наземных объектов представляет собой многопрофильную задачу. В частности, необходимо обеспечить требуемую энергоэффективность холодильного цикла, экологическую безопасность производства, эксплуатации и утилизации холодильной установки. При этом важную роль играют уровни рабочих давлений в цикле, которые влияют на доступность, стоимость и безопасность холодильного оборудования, а также — пожарная безопасность рабочего вещества.

Цель — провести исследование смеси диметилового эфира и диоксида углерода на предмет возможности энергоэффективного и безопасного применения в СКВ наземных объектов.

Методы. Сравнительный расчетный анализ простого одноступенчатого пароконденсационного цикла с традиционными рабочими веществами (R22 и R410A) рабочим веществом в виде смеси диметилового эфира и диоксида углерода с использованием расчетных пакетов Mathcad, HYSYS, CoolPack и REFPROP.

Результаты. Предложена экологичная смесь диметилового эфира и диоксида углерода с малым потенциалом глобального потепления (GWP) и нулевым потенциалом истощения озонового слоя (ODP). Увеличение процентного содержания диметилового эфира (ДМЭ) в смеси уменьшает температурный глайд в газоохладителе, являющийся свойством CO_2 , а также уменьшает давления, при которых работает смесь. В связи с горючестью диметилового эфира эксплуатационные свойства смеси ограничены, однако, с точки зрения экологических показателей данный вариант представляет некоторый интерес для практического использования.

Заключение. Проведен расчет по пожарной безопасности. Определена концентрация диметилового эфира в смеси, при которой смесь становится горючей и небезопасной для применения в системах кондиционирования, равная 8,3%.

С увеличением содержания диметилового эфира в смеси ДМЭ и CO_2 в пределах от 4 до 8% увеличивается холодильный коэффициент цикла с 2,53 до 2,88, но он в 1,57 раза меньше, чем у R410A.

Определена разница рабочих давлений между применяемыми неэкологичными хладагентами и предлагаемой к использованию смесью. Она позволяет сделать вывод, что в текущем виде смесь диметилового эфира и диоксида углерода неприменима на компрессорах массового производства, используемых для хладагента R410A. Давление конденсации наиболее эффективной и негорючей смеси ДМЭ и CO_2 (с концентрацией ДМЭ 8%) составляет 101 бар против 30 бар для R410A.

В дальнейшем предполагается проверить смеси диметилового эфира с другими веществами.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха; экологически безопасное рабочее вещество; энергоэффективная и экологически безопасная система кондиционирования воздуха; смесь диоксида углерода и диметилового эфира в качестве хладагента для наземной системы кондиционирования воздуха.

Как цитировать:

Жаров А.А., Гаранов С.А., Талызин М.С., Ковальчук Н.А. Смесь диоксида углерода и диметилового эфира в качестве хладагента для наземной системы кондиционирования воздуха // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 3. С. 171–178. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551799>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551799>

A mixture of carbon dioxide and dimethyl ether as a refrigerant for ground air conditioning system

Anton A. Zharov, Sergey A. Garanov, Maxim S. Talyzin, Nikita A. Kovalchuk

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The selection of refrigerants for modern air conditioning systems (ACS) in ground facilities is a multidisciplinary task. Particularly, meeting the required energy efficiency of the refrigeration cycle as well as ensuring ecological safety of production, operation, and utilization of the refrigeration system. Herein, the working pressure levels of the refrigeration cycle considerably affect the availability, cost, and safety of the refrigeration equipment. The fire safety of the working substance is also important.

AIM: To investigate the feasibility of a mixture of dimethyl ether and carbon dioxide as refrigerant for energy efficient and safe application of ACS in ground facilities.

METHODS: Comparative analysis of a simple one-stage vapor–compression cycle using traditional working substances (R22 and R410A) and the proposed working substance, which is in the form of a mixture of dimethyl ether and carbon dioxide, using packages, such as Mathcad, HYSYS, CoolPack, and REFPROP, was performed.

Results: An ecofriendly mixture of dimethyl ether and carbon dioxide with low global warming potential and zero ozone depletion potential was proposed as refrigerant. Increasing the percentage of dimethyl ether in the blend reduces the temperature glide in the gas cooler, a property of CO₂, and pressures at which the blend operates. The mixture has limited operational properties due to the flammability of dimethyl ether, but its environmental performance makes the material of some practical interest.

CONCLUSION: Fire safety of the proposed working substance was calculated. The concentration of dimethyl ether in the mixture at which it becomes flammable and unsafe for ACS was determined to be 8.3%.

With an increase in the dimethyl ether content in the mixture with CO₂ from 4% to 8%, the refrigeration coefficient of the cycle increases from 2.53 to 2.88, but it is 1.57 times less than that of R410A.

The difference in operating pressures between the used non-ecological refrigerants and proposed mixture was determined. Results indicate that the mixture of dimethyl ether and carbon dioxide is currently inapplicable to mass production compressors, which use R410A as refrigerant. The condensation pressure of the most effective and nonflammable mixture of dimethyl ether and CO₂ (with dimethyl ether concentration of 8%) is 101 bar against 30 bar for R410A.

Therefore, we intend to evaluate test mixtures of dimethyl ether with other substances in the future.

Keywords: environmentally safe working substance; energy efficient and environmentally safe air conditioning system; refrigerant.

To cite this article:

Zharov AA, Garanov SA, Talyzin MS, Kovalchuk NA. A mixture of carbon dioxide and dimethyl ether as a refrigerant for ground air conditioning system. *Refrigeration Technology*. 2021;110(3):171–178. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551799>

ВВЕДЕНИЕ

Выбор хладагентов для современных систем кондиционирования воздуха (СКВ) наземных объектов представляет собой многопрофильную задачу. В частности, необходимо обеспечить требуемую энергоэффективность холодильного цикла, экологическую безопасность производства, эксплуатации и утилизации холодильной установки. При этом важную роль играют уровни рабочих давлений в цикле, которые влияют на доступность, стоимость и безопасность холодильного оборудования. Важной также является и пожарная безопасность рабочего вещества.

Начиная с 1970-х годов с целью минимизации вредного воздействия на окружающую среду стали вводиться ограничения на использование определенных групп хладагентов, таких, как хлорфторуглероды (ХФУ), разрушающие озоновый слой [1], доказательство чему было обнаружено в 1987 [2]. Последствия разрушения озонового слоя описаны в [3] и [4]. Поворотными моментами, повлекшими к кардинальному изменению динамики используемых веществ, стали Монреальский ([5], [6]) и Киготский ([7], [8]) протоколы, закрепившие экологичность вещества как весомый критерий при его выборе.

Экологичность хладагента оценивается по двум параметрам — потенциалу истощения озонового слоя (ODP) и потенциалу глобального потепления (GWP). Первый — показывает насколько вещество опасно для озонового слоя, второй — насколько данное рабочее вещество может способствовать процессу глобального потепления климата. За единицу потенциала истощения озонового слоя принят коэффициент хладагента R11. За единицу потенциала глобального потепления принят коэффициент диоксида углерода.

Наибольшее распространение в настоящее время имеют СКВ с парокомпрессионными холодильными циклами. До недавнего времени в парокомпрессионных установках кондиционирования воздуха ХФУ были основным рабочим телом. ХФУ получают из углеводородов посредством замещения атомов водорода атомами хлора и фтора. Согласно положениям Монреальского протокола [9], принятого в 1987 году, использование таких хладонов было прекращено в большинстве стран, а с 2013 года в Российской Федерации запрещен ввоз озоноразрушающих веществ и содержащей их продукции. Результаты влияния человечества на парниковый эффект, в том числе, в силу использования неэкологичных хладонов в течение 20-го века, представлены в [10]. Следует отметить, что с каждым новым улучшением в методологии [10] прогнозы норвежских и американских ученых становятся все более мрачными.

С учетом вышесказанного, наиболее оптимальной заменой ХФУ в СКВ являются природные хладагенты. К их числу можно отнести воздух, воду, аммиак, пропан, изобутан, диоксид углерода, дметилловый эфир (ДМЭ) и др.

Одним из примечательных хладонов с точки зрения экологичности является R1234yf. Однако, в рамках данной работы он не будет рассматриваться в силу его высокой стоимости и отсутствия производства данного хладагента в России.

Вызывает особый интерес диоксид углерода, поскольку он озонобезопасен, имеет единичный потенциал глобального потепления, пожаробезопасен, в малых концентрациях нетоксичен, экологичен. Однако, среди его особенностей наблюдается более высокий уровень рабочих давлений по сравнению с традиционными хладагентами (от 40 до 140 бар, вместо 6–26 бар для традиционного озонобезопасного хладагента R407C), более высокая тройная точка ($-56,6$ °C) и более низкая критическая точка ($31,06$ °C). На практике, тройная точка связана с выпадением сухого льда, что следует учитывать при эксплуатации системы в регионах с пониженной температурой окружающей среды.

При равных условиях, диоксид углерода несколько проигрывает пропану и аммиаку [11].

Использование диоксида углерода в СКВ в условиях умеренного или более жаркого климата возможно только в транскритических циклах [12], в которых и наблюдаются повышенные давления.

Для снижения рабочих давлений в цикле СКВ при использовании CO_2 возможно применение не чистого CO_2 , а его смеси с веществом, имеющим в тех же условиях значительно меньшие давления. Одним из таких веществ является ДМЭ, исследованием которого довольно долго занималась кафедра «Холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана [13].

Диметилловый эфир — сопродукт производства этилового спирта, стоит меньше бензина, экологически безопасен и эффективен. С точки зрения экологии также нужно отметить, что диметилловый эфир можно получить гидрогенизацией из диоксида углерода [14], что вносит дальнейший вклад в борьбу человечества с парниковыми газами. Обычно, диметилловый эфир хранится в жидком виде, и может быть альтернативой существующим топливам как сам по себе [15, 16], так и в составе смеси [17]; например, при использовании в дизельных двигателях они производят меньше шума [18], и сами двигатели при переходе на диметилловый эфир изменять не обязательно [19]. Однако, он среднетоксичен и горюч.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью исследования является изучение смеси диметилового эфира и диоксида углерода на предмет возможности энергоэффективного и безопасного применения в СКВ. У диметилового эфира и диоксида углерода имеются недостатки, которые препятствуют их практическому применению в полной мере. Горючие вещества,

такие как диметиловый эфир использовать небезопасно, особенно это касается кондиционеров большой мощности. В свою очередь, диоксид углерода при его использовании в парокомпрессионных циклах для СКВ будет иметь более высокий диапазон давлений по сравнению с традиционными хладагентами (от 40 до 140 бар), что требует более прочного и дорогостоящего оборудования, чем при использовании традиционных хладагентов, таких как R410A.

Предполагается, что можно составить такую смесь диметилового эфира и диоксида углерода, которая будет одновременно негорючей или горючей в разрешенных пределах и, в то же время, будет иметь ощутимо более низкие уровни давления, в идеальном случае равные давлениям в системах с R410A, что позволит использовать массово производимое холодильное оборудование для R410A (главным образом компрессоры).

Первая задача, которая была поставлена — подбор концентрации компонентов смеси на основании критериев пожарной безопасности. Предварительный расчет показал, что при концентрации диметилового эфира, превышающей 8,3% от смеси, смесь становится горючей, поэтому сравнение с уже используемыми веществами R22 и R410A будет проведено для концентраций диметилового эфира от 4 до 8%.

Конечная задача настоящей работы — сравнение холодопроизводительности данных веществ в рамках простого парокомпрессионного цикла (рис. 1), что позволит сделать вывод о том, возможно ли использование уже производимых серийно компрессоров для данной смеси.

МЕТОДЫ

Простой парокомпрессионный цикл был рассмотрен в рамках работ [20] и [21]. Сравнительная таблица свойств используемых в рамках работы хладагентов представлена в таблице 1.

Исходные данные: требуемая холодопроизводительность, объемный или массовый расход воздуха на входе в испаритель, температура и относительная влажность воздуха на входе в испаритель и температура воздуха на выходе из испарителя, температура охлаждающего воздуха на входе в конденсатор, барометрическое давление. Первоначально задается недорекуперация

в теплообменниках — конденсаторе и испарителе, исходя из чего, определяется температура конденсации хладагента.

Для расчета могут использоваться расчетные пакеты Mathcad, HYSYS, CoolPack и REFPROP.

Алгоритм расчета:

1. Определяются координаты точки 1 — всасывание в компрессор, перегрев отсутствует, точка находится на линии насыщенного пара.
2. Определяются координаты точки 2 — нагнетание из компрессора, изоэнтальпное сжатие (принято для проведения сравнительной оценки); соответствует энтропии точки 1 и давлению при температуре конденсации хладагента.
3. Определяются координаты точки 3 — при температуре конденсации хладагента она находится на линии насыщенной жидкости.
4. Определяются координаты точки 4 — соответствует выходу из дросселя (TPB), следовательно, энтальпии точки 3 и температуре точки 1.
5. Определяется теплоемкость воздуха при нормальном давлении и средней температуре воздуха в испарителе.

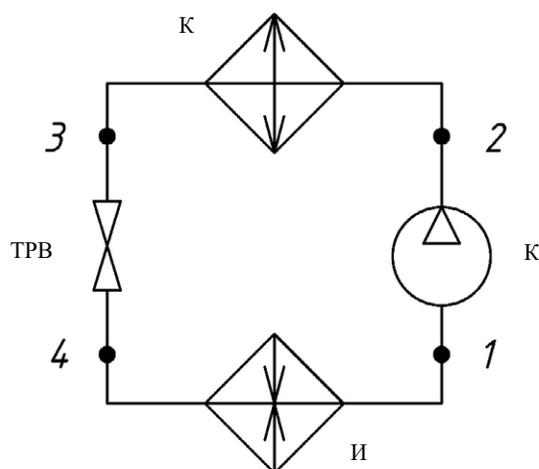


Рис. 1. Схема простого парокомпрессионного цикла. Км — компрессор, К — конденсатор, TPB — дроссель (терморегулирующий вентиль), И — испаритель.

Fig. 1. Schematic of a simple vapor-compression cycle. Km — compressor, K — condenser, TPB — thermostatic control valve (throttle), and И — evaporator.

Таблица 1. Сравнительная таблица свойств хладагентов

Table 1. Comparative table of refrigerant properties

Вещество	ODP	GWP	Доп. концентрация, ppm
R22	0,05	1810	1000
R410A	0	2088	1000
R744 (CO ₂)	0	1	1400
R-E710 (DMЭ)	0	0,3	1000

6. Определяется требуемый массовый расход хладагента по соотношению:

$$G_{\text{хладоаа}} = \frac{G_{\text{возд}} \cdot c_{p,\text{возд}} \cdot (T_{\text{вход,и}} - T_{\text{выход,и}})}{h_1 - h_4} \quad (1)$$

где $G_{\text{возд}}$ — массовый расход воздуха; $c_{p,\text{возд}}$ — теплоемкость воздуха, найденная в 5); $T_{\text{вход,и}}$, $T_{\text{выход,и}}$ — температура на входе и выходе из испарителя; h_1, h_4 — энтальпии точек, соответствующих всасыванию в компрессор и выходу из дросселя.

7. Определяется работа изоэнтропного сжатия в компрессоре:

$$l_{\text{км}} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

где h_2 — точка, соответствующая концу процесса сжатия;

8. Определяется холодильный коэффициент:

$$\varepsilon_x = \frac{Q_x}{N_{\text{км}}} \quad (3)$$

где Q_x — требуемая холодопроизводительность; $N_{\text{км}}$ — мощность компрессора, затрачиваемая при изоэнтропном сжатии.

В рамках данной работы приняты следующие исходные данные: температуру кипения хладагента 7 °С, перегрев хладагента в испарителе 10 °С, температура воздуха окружающей среды 35 °С, следовательно, для субкритических циклов температура конденсации 50 °С, а переохлаждение 5 °С, а для транскритических циклов — температура хладагента на выходе из газоохладителя 45 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложена экологичная смесь диметилового эфира и диоксида углерода с малым GWP и нулевым ODP.

Результаты расчетов простых парокомпрессионных циклов на выбранных для сравнения хладагентах представлены в таблице 2.

Увеличение процентного содержания диметилового эфира в смеси уменьшает температурный глайд в газоохладителе, являющийся свойством CO_2 , а также уменьшает давления, при которых работает смесь. В связи с горючестью диметилового эфира эксплуатационные свойства смеси ограничены, однако, с точки зрения экологических показателей, данный вариант представляет некоторый интерес для практического использования.

Расчет показал, что предложенная смесь ДМЭ и CO_2 менее энергоэффективна, чем уже используемые вещества, с точки зрения холодильного коэффициента. Следует отметить, что чистый ДМЭ работает на близких с сравниваемыми веществами диапазонах давлений, однако его горючесть и токсичность ограничивают его применение. Имеет смысл попробовать смесь диметилового эфира с другим хладагентом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен расчет по пожарной безопасности. Определена концентрация диметилового эфира в смеси, при которой смесь становится горючей и небезопасной для применения в системах кондиционирования, равная 8,3%.
2. С увеличением содержания диметилового эфира в смеси ДМЭ и CO_2 в пределах от 4 до 8% увеличивается холодильный коэффициент цикла с 2,53 до 2,88, но он в 1,57 раза меньше, чем у R410A.
3. Определена разница рабочих давлений между применяемыми неэкологичными хладагентами и предлагаемой к использованию смесью. Она позволяет сделать вывод, что в текущем виде смесь диметилового эфира и диоксида углерода неприменима на компрессорах массового производства, используемых для хладагента R410A. Давление

Таблица 2. Зависимость холодильного коэффициента в цикле в зависимости от вещества

Table 2. Dependence of the refrigeration coefficient on the cycle and substance

Состав смеси	Процентное соотношение	Уровень давлений кипения-конденсации, бар	ε_x
R22	100	6–19	5,08
R410A	100	10–30	4,52
R744; R-E710	96; 4	39–105	2,53
R744; R-E710	95; 5	38–104	2,65
R744; R-E710	94; 6	38–103	2,74
R744; R-E710	93; 7	38–102	2,82
R744; R-E710	92; 8	37–101	2,88
R-E710	100	3–11	5,38

конденсации наиболее эффективной и негорючей смеси ДМЭ и CO₂ (с концентрацией ДМЭ 8%) составляет 101 бар против 30 бар для R410A.

4. В дальнейшем предполагается проверять смеси диметилового эфира с другими веществами.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone // *Nature*. 1974. Vol. 249. P. 810–812. doi: 10.1038/249810a0
2. Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction // *Nature*. 1985. Vol. 315. P. 207–210. doi: 10.1038/315207a0
3. Scientific assessment of ozone depletion: 2010. WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 52. WMO, 2011.
4. Andrady A., Aucamp P.J., Austin A.T., et al. Environmental effects of effects of ozone depletion and its interaction with climate change: progress report, 2011 // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2012. Vol. 11. P. 13–27. doi: 10.1039/c1pp90033a
5. Mäder J.A., Staehelin J., Peter T., et al. Evidence for the effectiveness of the Montreal Protocol to protect the ozone layer // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. Vol. 10. P. 12161–12171. doi: 10.5194/acp-10-12161-2010
6. Molina M., Zaelke D., Sarma K.M., et al. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. Vol. 106, N 49. P. 20616–20621. doi: 10.1073/pnas.0902568106
7. Grunewald N., Martinez-Zarzoso I. Did the Kyoto Protocol fail? An evaluation of the effect of the Kyoto Protocol on CO₂ emission // *Environment and Development Economics*. 2015. Vol. 21, N 01. P. 1–22. doi: 10.1017/s1355770x15000091
8. Aichele R., Felbermayr G. The Effect of the Kyoto Protocol on Carbon Emissions // *Journal of Policy Analysis and Management*. 2013. Vol. 32, N 4. P. 731–757. doi: 10.1002/pam.21720
9. Velders G.J.M., Andersen S.O., Daniel J.S., et al. The importance of the Montreal Protocol in protecting climate // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007. Vol. 104, N 12. P. 4814–4819. doi: 10.1073/pnas.0610328104
10. Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., et al. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // *Environ. Res. Lett.* 2019. Vol. 14. P. 045010. doi: 10.1088/1748-9326/aafc1b
11. Sarkar J., Bhattacharyya S., Ram Gopal M. Natural refrigerant-based subcritical and transcritical cycles for high temperature

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

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

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

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

- heating // *International Journal of Refrigeration*. 2007. Vol. 30, N 1. P. 3–10. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.03.008
12. Cayer E., Galanis N., Desilets M., et al. Analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature source // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86, N 7–8. P. 1055–1063. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.09.018
13. Arkharov A.M., Glukhov S.D., Grekhov L.V., et al. Use of dimethyl ether as engine fuel and cooling medium // *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie*. 2003. Vol. 6. P. 17–21.
14. Catizzone E., Bonura G., Migliori M., et al. CO₂ Recycling to Dimethyl Ether: State-of-the-Art and Perspectives // *Molecules*. 2017. Vol. 23, N 1. P. 31. doi: 10.3390/molecules23010031
15. Azizi Z., Rezaeimanesh M., Tohidian T., et al. Dimethyl Ether: A Review of Technologies and Production Challenges // *Chemical Engineering and Processing*. 2014. doi: 10.1016/j.ccep.2014.06.007
16. Sorenson S.C. Dimethyl Ether in Diesel Engines: Progress and Perspectives // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2001. Vol. 123, N 3. P. 652. doi: 10.1115/1.1370373
17. Anggarani R., Maymuchar Wibowo C.S., Sukaraha R. Performance and Emission Characteristics of Dimethyl Ether (DME) Mixed Liquefied Gas for Vehicle (LGV) as Alternative Fuel for Spark Ignition Engine // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 65. P. 274–281. doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.048
18. Aboul-Fotouh S.M.K. Production of dimethylether (DME) as a clean fuel using sonochemically prepared CuO and/or ZnO-modified γ -alumina catalysts // *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 2014. Vol. 42, N 3. P. 350–356. doi: 10.1016/s1872-5813(14)60020-7
19. Semelsberger T.A., Borup R.L., Greene H.L. Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel // *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 156, N 2. P. 497–511. doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.05.082
20. Воронов В.А., Журлова П.Ю., Соловов В.В., и др. Подбор экономических смесевых хладагентов для парокомпрессионных холодильных машин и насосов // *Научно-практический электронный журнал Аллея Науки*. 2017. №10.
21. Гаранов С.А., Воронов В.А., Заболотный Д.Ю., и др. Стенд парокомпрессионного теплового насоса // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2016. №1(49). С. 6.

REFERENCES

1. Molina MJ, Rowland FS. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*. 1974;249:810–812. doi: 10.1038/249810a0
2. Farman JC, Gardiner BG, Shanklin JD. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature*. 1985;315:207–210. doi: 10.1038/315207a0
3. Scientific assessment of ozone depletion: 2010. WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 52. WMO, 2011.
4. Andrady A, Aucamp PJ, Austin AT, et al. Environmental effects of effects of ozone depletion and its inter one depletion and its interactions with climate actions with climate change: progress report, 2011. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2012;11:13–27. doi: 10.1039/c1pp90033a
5. Mäder JA, Staehelin J, Peter T, et al. Evidence for the effectiveness of the Montreal Protocol to protect the ozone layer. *Atmos. Chem. Phys.* 2010;10:12161–12171. doi: 10.5194/acp-10-12161-2010
6. Molina M, Zaelke D, Sarma KM, et al. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009;106(49):20616–20621. doi: 10.1073/pnas.0902568106
7. Grunewald N, Martinez-Zarzoso I. Did the Kyoto Protocol fail? An evaluation of the effect of the Kyoto Protocol on CO₂ emission. *Environment and Development Economics*. 2015;21(01):1–22. doi: 10.1017/s1355770x15000091
8. Aichele R, Felbermayr G. The Effect of the Kyoto Protocol on Carbon Emissions. *Journal of Policy Analysis and Management*. 2013;32(4):731–757. doi: 10.1002/pam.21720
9. Velders GJM, Andersen SO, Daniel JS, et al. The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007;104(12):4814–4819. doi: 10.1073/pnas.0610328104
10. Box JE, Colgan WT, Christensen TR, et al. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. *Environ. Res. Lett.* 2019;14:045010. doi: 10.1088/1748-9326/aafc1b
11. Sarkar J, Bhattacharyya S, Ram Gopal M. Natural refrigerant-based subcritical and transcritical cycles for high temperature heating. *International Journal of Refrigeration*. 2007;30(1):3–10. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.03.008
12. Cayer E, Galanis N, Desilets M, et al. Analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature source. *Applied Energy*. 2009;86(7–8):1055–1063. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.09.018
13. Arkharov AM, Glukhov SD, Grekhov LV, et al. Use of dimethyl ether as engine fuel and cooling medium. *Khimicheskoe / Neftegazovoe Mashinostroenie*. 2003;6:17–21.
14. Catizzone E, Bonura G, Migliori M, et al. CO₂ Recycling to Dimethyl Ether: State-of-the-Art and Perspectives. *Molecules*. 2017;23(1):31. doi: 10.3390/molecules23010031
15. Azizi Z, Rezaeimanesh M, Tohidian T, et al. Dimethyl Ether: A Review of Technologies and Production Challenges. *Chemical Engineering and Processing*. 2014. doi: 10.1016/j.ccep.2014.06.007
16. Sorenson SC. Dimethyl Ether in Diesel Engines: Progress and Perspectives. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2001;123(3):652. doi: 10.1115/1.1370373
17. Anggarani R, Maymuchar Wibowo CS, Sukaraha R. Performance and Emission Characteristics of Dimethyl Ether (DME) Mixed Liquefied Gas for Vehicle (LGV) as Alternative Fuel for Spark Ignition Engine. *Energy Procedia*. 2015;65:274–281. doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.048
18. Aboul-Fotouh SMK. Production of dimethylether (DME) as a clean fuel using sonochemically prepared CuO and/or ZnO-modified γ -alumina catalysts. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 2014;42(3):350–356. doi: 10.1016/s1872-5813(14)60020-7
19. Semelsberger TA, Borup RL, Greene HL. Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*. 2006;156(2):497–511. doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.05.082
20. Voronov VA, Zhurlova PYu, Solovov VV, et al. Podbor ekonomichnykh smesevykh khladagentov dlya parokompressionnykh kholodilnykh mashin i nasosov. *Nauchno-prakticheskiy elektronnyy zhurnal Alleya Nauki*. 2017;10. (In Russ).
21. Garanov SA, Voronov VA, Zabolotnyy DYu, et al. Stend parokompressionnogo teplovogo nasosa. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2016;1(49):6. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Жаров Антон Андреевич,

к.т.н.;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

Лефортовская наб, д. 1;

ORCID: 0000-0001-9945-0850;

eLibrary SPIN: 8581-1809;

e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Гаранов Сергей Александрович,

к.т.н.;

eLibrary SPIN: 8646-2754;

e-mail: garanovsa@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

* Anton A. Zharov,

Cand. Sci. (Tech.);

address: 1 Lefortovskaja naberezhnaja, 105005, Moscow,

Russian Federation;

ORCID: 0000-0001-9945-0850;

eLibrary SPIN: 8581-1809;

e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Sergey A. Garanov,

Cand. Sci. (Tech.);

eLibrary SPIN: 8646-2754;

e-mail: garanovsa@bmstu.ru

Талызин Максим Сергеевич,

к.т.н.;

ORCID: 0000-0001-7244-1946;

eLibrary SPIN: 6524-3085;

e-mail: talyzin@bmstu.ru

Ковальчук Никита Андреевич;

ORCID: 0009-0008-2569-8210;

e-mail: kovalchukna@student.bmstu.ru

Автор, ответственный за переписку

Maxim S. Talyzin,

Cand. Sci. (Tech.);

ORCID: 0000-0001-7244-1946;

eLibrary SPIN: 6524-3085;

e-mail: talyzin@bmstu.ru

Nikita A. Kovalchuk;

ORCID: 0009-0008-2569-8210;

e-mail: kovalchukna@student.bmstu.ru

* Corresponding author