

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>

УДК 658.261:621.56

## Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок

А. В. Овсянник<sup>1)</sup>, В. П. Ключинский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
(Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** В статье рассмотрены 46 низкокипящих рабочих тел (НКРТ), имеющих нулевой потенциал разрушения озонового слоя: 14 однокомпонентных гидрофторуглеродных хладагентов, 28 многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов и четыре природных хладагента. Произведен термодинамический анализ рабочих тел на базе классической турбодетандерной схемы с теплообменным аппаратом, предназначенным для охлаждения перегретого НКРТ, покинувшего турбодетандер. Для данной схемы построен цикл в  $T$ - $s$ -координатах. Сравнение НКРТ производилось по эксергетическому коэффициенту полезного действия (КПД). В ходе исследования выявлено, что для некоторых НКРТ последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных с термодинамической точки зрения давлениях рабочих тел сохраняется на всем изучаемом интервале температур (от 100 до 300 °С). Иными словами, если рабочее тело имеет наибольший эксергетический КПД, то это свойство присуще ему при любой температуре в заданном интервале. Анализ НКРТ по эксергетическому КПД предложенно проводить по произвольно выбранной температуре (250 °С). Исследование показало, что наибольшим эксергетическим КПД из природных хладагентов обладает R600A (50,25 %), среди однокомпонентных гидрофторуглеродных хладагентов – R245FA (50,00 %), R1233ZD(E) (49,91 %), R236EA (49,59 %), среди многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов – R429A (47,92 %), R430A (47,49 %) и R423A (47,47 %). Из всех рассмотренных НКРТ наибольший эксергетический КПД имеют: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. Они принадлежат как к природным хладагентам (углеводороды), так и к однокомпонентным гидрофторуглеродным. Следует отметить, что у каждого из этих рабочих тел есть свои недостатки: одни обладают высоким потенциалом глобального потепления, другие взрывоопасны, третьи имеют высокую стоимость.

**Ключевые слова:** турбодетандер, фреон, хладагент, вторичные энергетические ресурсы, тепловые отходы, термодинамическая эффективность, эксергетический анализ, потенциал разрушения озонового слоя, потенциал глобального потепления, гидрофторуглероды, природные хладагенты, смесевые хладагенты, однокомпонентные хладагенты, температура кипения, низкопотенциальная энергия, эмиссия парниковых газов, изменение климата

**Для цитирования:** Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>

---

### Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич  
Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48,  
246746, г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел.: +375 232 40-20-36  
ovsyannik@tut.by

### Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.  
Sukhoi State Technical  
University of Gomel  
48, Octiabria Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 40-20-36  
ovsyannik@tut.by

---

## Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants

A. V. Ovsyannik<sup>1)</sup>, V. P. Kliuchinski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article considers 46 low-boiling working media (LBWM) with zero potential for ozone layer destruction. Out of them, 14 ones are single-component hydrofluorocarbon refrigerants, 28 ones are multi-component mixtures of hydrofluorocarbon refrigerants, and the four ones are native refrigerants. Thermodynamic analysis of working media based on the classical turbo-expander scheme with a heat exchanger designed to cool the superheated LBWM that has left the turbo-expander has been performed. For this scheme, a cycle is constructed in  $T$ - $s$ -coordinates. The LBWM was compared using the exergetic coefficient of efficiency (KE). In the course of the study, it was found that for some LBWM, the sequence of location of the exergetic efficiency dependences on temperature at thermodynamically optimal working medium pressures is preserved over the entire temperature range under study (from 100 to 300 °C). In other words, if the working medium has the highest exergetic efficiency coefficient, then this property is inherent in it at any temperature in a given interval. It is proposed to perform the analysis of the LBWM for exergetic efficiency at an arbitrarily selected temperature (250 °C). The study demonstrated that the highest exergetic efficiency of natural refrigerants is R600A (50.25 %), among single-component hydrofluorocarbon refrigerants – R245FA (50.00 %), R1233ZD(E) (49.91 %), R236EA (49.59 %), among multi-component mixtures of hydrofluorocarbon refrigerants – R429A (47.92 %), R430A (47.49 %) and R423A (47.47 %). Out of the all examined refrigerants, the following ones have the highest exergetic efficiency of all the considered LBWM: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. They belong to both natural refrigerants (hydrocarbons) and single-component hydrofluorocarbons. It should be noted that each of these working media has its drawbacks: some have a high potential for global warming, others are explosive, and others have a high cost.

**Keywords:** turbodetander, freon, refrigerant, secondary energy resources, thermal waste, thermodynamic efficiency, exergetic analysis, ozone layer destruction potential, global warming potential, hydrofluorocarbons, natural refrigerants, mixed refrigerants, single-component refrigerants, boiling point, low-potential energy, greenhouse gas emissions, climate change

**For citation:** Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian)

### Введение

Все более широкое применение в современной энергетике приобретают турбодетандерные установки с рабочим телом, имеющим более низкую, чем у воды, температуру кипения. Благодаря этому испарение низкокипящего рабочего тела происходит при относительно низкой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию.

Однако выбор рабочего тела является сложной и многокритериальной задачей [1–4]. Решения Монреальского протокола коренным образом изменили подход к традиционным озоноразрушающим хладагентам, и начиная с 1990-х гг. на одно из первых мест вышел вопрос об опасности изменения климата и сохранения эмиссии парниковых газов, вызванной такими хладагентами. Для анализа экологической целесообразности применения хладагентов используют следующие параметры: озоноразрушающий потенциал (ОРП) и потенциал глобального потепления (ПГП) (парникового эффекта). Для хладагентов группы хлорфторуглероды  $ОРП \geq 1$ , для гидрохлорфторуглеродов  $ОРП < 0,1$ , а для гидрофторуглеродов  $ОРП = 0$  [5].

Таким образом, основные требования к НКРТ можно разделить на следующие группы: экологические, термодинамические, эксплуатационные, экономические. Хладагенты, отвечающие всем перечисленным требованиям, найти практически невозможно [6]. С термодинамической точки зрения одним из основных критериев выбора рабочего тела является максимальная удельная работа цикла или максимальный коэффициент полезного действия.

Эксергия – предельное значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе с учетом ограничений, накладываемых законами термодинамики. Эксергетический анализ, учитывающий потери от неравновесности процессов в системе, позволяет выполнить как относительную, так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства применяемых технологий по сравнению с анализом, основанным на энергетическом КПД [7–9].

Предлагается оценить эффективность НКРТ, обладающих нулевым потенциалом разрушения озонового слоя, при помощи эксергетического КПД. Методика термодинамического анализа турбодетандерных циклов на НКРТ представлена в [10].

### Турбодетандерная схема и принцип ее работы

Исследования проводились на примере классической турбодетандерной схемы с теплообменным аппаратом на выходе из турбодетандера, предназначенным для охлаждения перегретого НКРТ, покинувшего турбодетандер (рис. 1).

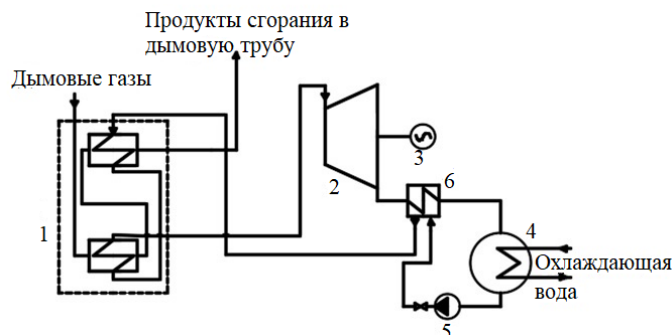


Рис. 1. Схема турбодетандерного цикла: 1 – котел-утилизатор; 2 – турбодетандер; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменник

Fig. 1. The scheme of the turbo-expander cycle: 1 – heat recovery boiler; 2 – turbo expander; 3 – generator; 4 – condenser; 5 – pump; 6 – heat exchanger

Принцип работы представленной схемы следующий: из конденсатора 4 жидкое НКРТ насосом 5 подается в теплообменный аппарат 6, где нагревается парами НКРТ, поступающими в теплообменный аппарат из турбодетандера 2. После нагрева в теплообменнике 6 рабочее тело направляется в котел-утилизатор 1, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее оно поступает в турбодетандер, где совершает механическую работу вращения вала турбодетандера 2, связанного муфтой с генератором электрического тока 3. Затем НКРТ, будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном

давлении, в теплообменнике 6 и поступает в конденсатор 4, где и конденсируется.

Для термодинамического анализа приняты следующие условия и исходные данные: объем, состав и температура продуктов сгорания неизменны во всех исследуемых случаях; температура на выходе из конденсатора (температура конденсации) равна 25 °С для всех рабочих тел; коэффициент полезного действия элементов установки для всех исследуемых случаев одинаковы. При этом расход рабочего тела выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась его необходимая температура на выходе из котла-утилизатора при неизменном объеме, составе и температуре продуктов сгорания. Выбор давления рабочего тела перед турбодетандером производится так, чтобы получить максимальный эксергетический КПД при данной температуре.

Цикл исследуемой схемы представлен на  $T$ - $s$ -диаграмме (рис. 2) на примере хладагента R245FA при температуре рабочего тела перед турбодетандером 250 °С и оптимальном давлении.

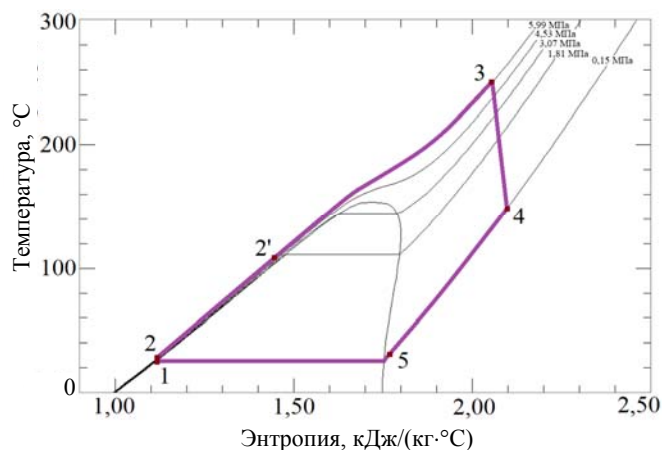


Рис. 2. Цикл турбодетандерной установки в  $T$ - $s$ -координатах

Fig. 2. The cycle of a turbo-expander unit presented in  $T$ - $s$ -coordinates

Цикл состоит из следующих процессов: 1–2 – повышение давления НКРТ в насосе 5; 2–2' – изобарный процесс нагрева рабочего тела в теплообменнике 6; 2'–3 – изобарный процесс нагрева, парообразования и перегрева в котле-утилизаторе 1; 3–4 – процесс расширения НКРТ в турбодетандере 2; 4–5 – изобарный процесс охлаждения паров хладагента в теплообменнике 6; 5–1 – изобарный процесс охлаждения и конденсации паров хладагента в конденсаторе 4.

### Термодинамический анализ и результаты исследований

В ходе исследования выявлено, что для некоторых НКРТ (рис. 3) последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных с термодинамической точки зрения давлениях рабочих тел сохраняется на всем изучаемом интервале температур (от 100 до 300 °С). Иными словами, рабочее тело, доминирующее по

эксергетическому КПД, является таковым при любой температуре в заданном интервале. Предложено анализ рабочих тел по эксергетическому КПД осуществлять по произвольно выбранной температуре (250 °С).

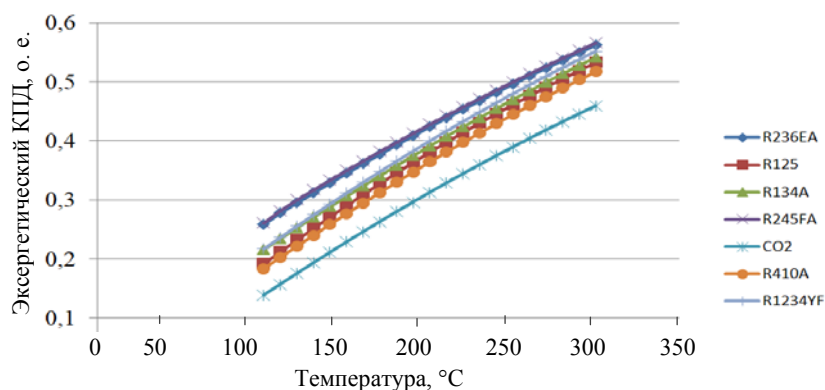


Рис. 3. Зависимость эксергетического коэффициента полезного действия от температуры для различных низкокипящих рабочих тел

Fig. 3. Dependence of exergetic efficiency on temperature for various low-boiling working fluids

На основе вышесказанного произведен расчет цикла для различных рабочих тел при температуре 250 °С. Рабочие тела, исследуемые в данной статье, некоторые их показатели, а также результаты расчетов представлены в табл. 1–3. Для удобства анализа полученные результаты приведены в виде диаграммы (рис. 4).

Таблица 1

**Исследуемые однокомпонентные хладагенты [11, 12]**

**Single-component refrigerants under study [11, 12]**

№ пп	Рабочее тело	ОРП	ППП (100 лет)	Давление НКРТ перед турбодетандером, МПа	Эксергетический КПД, %
1	R125	0	3450	13,32	46,15
2	R134A	0	1360	10,38	46,97
3	R143A	0	5080	11,94	46,50
4	R152A	0	124	9,02	46,56
5	R227EA	0	3220	9,16	48,34
6	R23	0	14760	16,65	40,58
7	R236EA	0	1370	6,78	49,59
8	R236FA	0	9810	7,43	48,72
9	R245FA	0	1030	5,98	50,00
10	R32	0	674	13,51	42,59
11	R1234YF	0	4	9,80	47,95
12	R1234ZE(E)	0	6	8,95	47,62
13	R1234ZE(Z)	0	1,4	5,51	49,42
14	R1233ZD(E)	0	1	4,91	49,91

Таблица 2

**Исследуемые смесевые хладагенты [11, 12]**

**The mixed refrigerants under study [11, 12]**

№ пп	Рабочее тело	ОРП	ПГП (100 лет)	Давление НКРТ перед турбодетандером, МПа	Эксергетический КПД, %
1	R404A		4200	12,38	46,38
2	R407A	0	2100	12,91	45,07
3	R407B	0	2800	13,28	45,58
4	R407C	0	1700	12,58	44,89
5	R407D	0	1600	11,88	45,27
6	R407E	0	1500	12,36	44,82
7	R410A	0	2100	14,14	44,47
8	R413A	0	2000	10,85	46,54
9	R417A	0	2300	11,86	46,20
10	R419A	0	2900	12,34	45,81
11	R421A	0	2600	12,24	45,98
12	R421B	0	3100	12,98	46,06
13	R422A	0	3100	12,90	46,23
14	R422B	0	2500	12,16	46,12
15	R422C	0	3000	12,84	46,19
16	R422D	0	2700	12,43	46,14
17	R423A	0	2200	10,10	47,47
18	R424A	0	2400	11,97	46,13
19	R425A	0	1500	11,60	45,28
20	R426A	0	1400	10,55	46,81
21	R427A	0	2200	12,34	45,26
22	R429A	0	21	8,88	47,92
23	R430A	0	120	9,25	47,49
24	R431A	0	46	10,84	47,26
25	R434A	0	3300	12,51	46,23
26	R435A	0	30	9,11	47,07
27	R437A	0	1700	11,01	46,46
28	R507A	0	4300	12,49	46,38
<b>Примечание.</b> Хладагенты R508A и R508B не рассматривались, так как их критическая температура ниже температуры конденсации НКРТ в конденсаторе (менее 25 °C).					

Таблица 3

**Исследуемые природные хладагенты [11, 12]**

**The natural refrigerants under study [11, 12]**

№ пп	Рабочее тело	ОРП	ПГП (100 лет)	Давление НКРТ перед турбодетандером, МПа	Эксергетический КПД, %
1	Диоксид углерода	0	1	21,92	38,92
2	Аммиак	0	0	12,98	39,88
3	R290	0	3	10,50	47,53
4	R600A	0	3	6,99	50,25

Как видно из рис. 4, наибольшим эксергетическим КПД обладает природный хладагент R600A (50,25 %). Среди однокомпонентных гидро-

фторуглеродных хладагентов наибольший эксергетический КПД имеют R245FA (50,00 %), R1233ZD(E) (49,91 %), R236EA (49,59 %), среди многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов – R429A (47,92 %), R430A (47,49 %) и R423A (47,47 %).

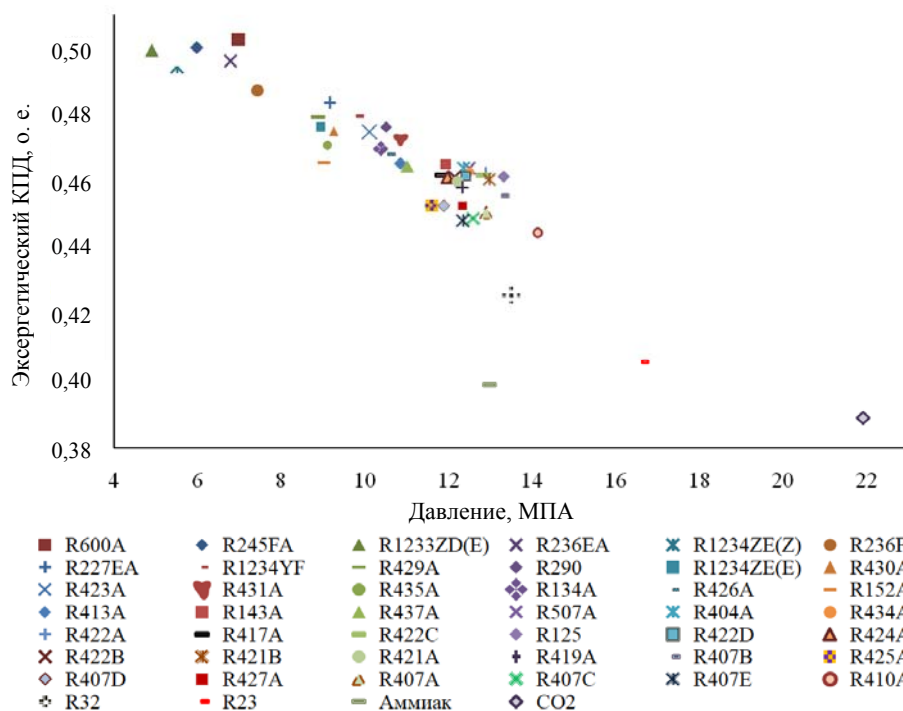


Рис. 4. Результаты исследований низкокипящих рабочих тел (указаны в порядке уменьшения их эксергетического КПД)

Fig. 4. The results of the study of the low-boiling working media (indicated in order of decreasing their exergetic efficiency)

Из всех рассмотренных НКРТ наибольшим эксергетическим КПД обладают следующие хладагенты: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. Они принадлежат как к природным хладагентам (углеводороды), так и к однокомпонентным гидрофторуглеродным. R600A (изобутан) имеет низкий потенциал глобального потепления (ПГП = 3), но при этом пожаровзрывоопасен; R245FA, R236EA и R236FA являются однокомпонентными гидрофторуглеродными хладагентами, но обладают довольно высоким потенциалом глобального потепления (ПГП R245FA = 1030, ПГП R236EA = 1370, ПГП R236FA = 9810); у R1233ZD(E), R1234ZE(Z) низкий потенциал глобального потепления (ПГП R1233ZD(E) = 4,91; ПГП R1234ZE(Z) = 5,51), они не взрывоопасны, но имеют довольно высокую стоимость.

Обратим внимание на следующую тенденцию: большим эксергетическим КПД обладают рабочие тела с меньшим оптимальным (с термодинамической точки зрения) давлением при данной исследуемой температуре. Изучив потери эксергии по элементам турбодетандерной установки выборочно для некоторых рабочих тел с различными эксергетическими КПД (рис. 5), не удалось выявить, какие из потерь эксергии оказывают решающее влияние

на выбор рабочего тела. Так, например, сравнив рабочие тела R1233ZD(E) и R236EA, можно заметить, что R1233ZD(E) имеет большие потери эксергии в котле-утилизаторе, однако меньшие потери эксергии в насосе и теплообменном аппарате делают его более эффективным по сравнению с R236EA. Сопоставление R236EA и R430A выявляет обратную тенденцию: R236EA, обладающий большим эксергетическим КПД, имеет меньшие потери эксергии в котле-утилизаторе, но большие потери в теплообменнике.

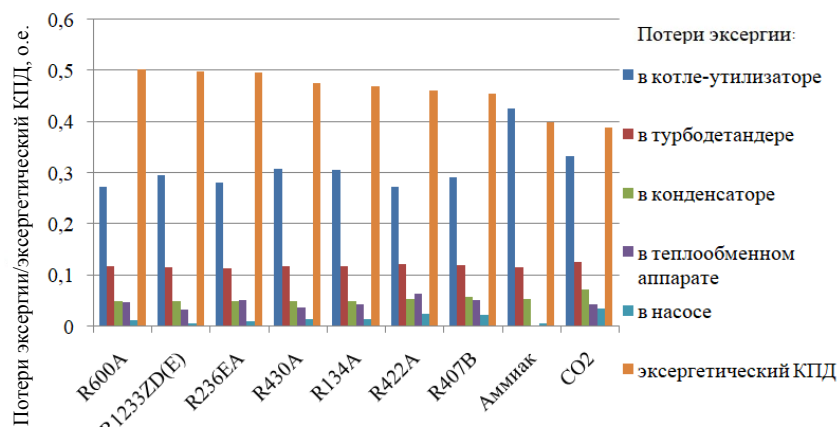


Рис. 5. Потери эксергии по элементам турбодетандерной установки

Fig. 5. Exergy losses according to the elements of a turbo-expander unit

## ВЫВОДЫ

1. Последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных с термодинамической точки зрения давлениях рабочих тел сохраняется на всем исследуемом интервале температур (от 100 до 300 °C), т. е. рабочее тело, обладающее наибольшим эксергетическим КПД при заданной температуре, имеет наибольший эксергетический КПД на всем исследуемом интервале температур.

2. Наибольшим эксергетическим КПД обладают следующие рабочие тела: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. Дальнейший анализ этих рабочих тел показал, что каждому из них присущи свои недостатки: у одних высокий потенциал глобального потепления, другие взрывоопасны, третьи имеют высокую стоимость. В ходе исследований выявлено, что большим эксергетическим КПД обладают рабочие тела с меньшим оптимальным (с термодинамической точки зрения) давлением при данной исследуемой температуре.

## ЛИТЕРАТУРА

1. On the Role of Working Fluid Properties in Organic Rankine Cycle Performance / M. Z. Stijepovic [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 36. P. 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.057>.
2. Fluid Selection and Parametric Optimization of Organic Rankine Cycle Using Low Temperature Waste Heat / Z. Q. Wang [et al.] // Energy. 2012. Vol. 40, Is. 1. P. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.022>.
3. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.



4. Овсянник, А. В. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 70–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79>.
  5. Бабакин, Б. С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. М.: Колос, 2000. 160 с.
  6. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // *Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2014. № 2. С. 99–124.
  7. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
  8. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
  9. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
  10. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. 2019. № 2. С. 41–51.
  11. Синтетические холодильные агенты, регулируемые Киотским протоколом / О. Б. Цветков [и др.] // *Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование*. 2015. № 4. С. 1–8.
  12. Озонобезопасные хладагенты / О. Б. Цветков [и др.] // *Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование*. 2014. № 3. С. 98–111.
- Поступила 20.02.2020    Подписана в печать 28.04.2020    Опубликована онлайн 30.11.2020

## REFERENCES

1. Stijepovic M. Z., Linke P., Papadopoulos A. I., Grujic A. S. (2012) On the Role of Working Fluid Properties in Organic Rankine Cycle Performance. *Applied Thermal Engineering*, 36, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.057>.
2. Wang Z., Zhou Q. N. J., Guo J., Wang X. Y. (2012) Fluid Selection and Parametric Optimization of Organic Rankine Cycle Using Low Temperature Waste Heat. *Energy*, 40 (1), 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.022>.
3. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
4. Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. (2018) Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 70–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79> (in Russian).
5. Babakin B. S., Stefanchuk V. I., Kovtunov E. E. (2000) *Alternative Refrigerants and Service of Refrigeration Systems Based on them*. Moscow, Kolos Publ. 160 (in Russian).
6. Belov G. V., Dorokhova M. A. (2014) Organic Rankine Cycle and its Application in Renewable Power Engineering. *Nauka i Obrazovanie = Science & Education*, (2), 99–124 (in Russian).
7. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).
8. Brodyanskii V. M., Fratscher V., Mikhalek K. (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
9. Shargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energia Publ. 280 (in Russian).
10. Ovsyannik A. V., Valchenko N. A., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I. (2019) Trigeneration of Energy in Carbon Dioxide Turbo-Expander Plants. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel]*, (2), 41–51 (in Russian).
11. Tsvetkov O. B., Baranenko A. V., Laptev Yu. A., Sapozhnikov S. Z., Fedorov A. V., Kushnerov A. B. (2015) Kyoto Protocol and Environmentally Acceptable Synthetic Halocarbon Refrigerants. *Nauchnyi Zhurnal NIU ITMO. Ser. Kholodil'naya Tekhnika i Konditsionirovanie = Scientific Journal NRU ITMO. Series Refrigeration and Air Conditioning*, (4), 1–8 (in Russian).
12. Tsvetkov O. B., Baranenko A. V., Sapozhnikov S. Z., Laptev Yu. A., Pyatakov G. L., Khovalyg D. M. (2014) Ozone Layer-Safe Refrigerants. *Nauchnyi Zhurnal NIU ITMO. Ser. Kholodil'naya Tekhnika i Konditsionirovanie = Scientific Journal NRU ITMO. Series Refrigeration and Air Conditioning*, (3), 98–111 (in Russian).

Received: 20 February 2020    Accepted: 28 April 2020    Published online: 30 November 2020