

УДК 658.261:621.56

Низкокипящие рабочие тела для турбоустановок на органическом цикле Ренкина

Д-р техн. наук А. В. ОВСЯННИК, канд. техн. наук В. П. КЛЮЧИНСКИЙ*

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

*E-mail: vlad240394@mail.ru

В работе проведено исследование термодинамических характеристик низкокипящих рабочих тел, используемых в турбинных установках, работающих по органическому циклу Ренкина (ОЦР). Особое внимание уделено анализу ключевых параметров, влияющих на эффективность работы энергетического оборудования, включая физико-химические свойства рабочих агентов и их эксплуатационные характеристики. В ходе исследования был выполнен детальный термодинамический анализ более тридцати различных низкокипящих соединений. Для каждого рабочего тела определены: показатели экологической безопасности (озоноразрушающий потенциал и потенциал глобального потепления), критические параметры состояния, удельная теплота конденсации, а также оптимальные значения давления в конденсаторе и на входе в турбину. Точность полученных результатов подтверждается минимальной погрешностью расчетов, не превышающей 10%. Особую научную ценность представляют выявленные зависимости эксергетического КПД от основных параметров рабочего тела. В частности установлено, что максимальная эффективность достигается при использовании веществ с минимальным критическим давлением и максимальной удельной теплотой конденсации. Графические зависимости демонстрируют влияние температуры и давления на входе в турбину на эксергетический КПД системы. Полученные результаты позволяют разработать научно обоснованную методику предварительного отбора рабочих тел для турбоустановок ОЦР, работающих в температурном диапазоне 100–300 °С. Практическая значимость исследования заключается в возможности оптимизации параметров энергетического оборудования и повышения эффективности преобразования тепловой энергии. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании современных энергетических установок, что способствует развитию энергосберегающих технологий и снижению экологической нагрузки.

Ключевые слова: турбоустановка, низкокипящее рабочее тело, оптимизация, эксергетический КПД, теплофизические свойства, эффективность, хладагент, критические параметры.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 24.06.2025, одобрена после рецензирования 05.08.2025, принята к печати 22.08.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-28-34

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Овсянник А. В., Ключинский В. П. Низкокипящие рабочие тела для турбоустановок на органическом цикле Ренкина. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 4. С. 28–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-28-34

Low-boiling working fluids for turbine installations on the organic Rankine cycle

D. Sc. A. V. OVSYANNIK, Ph. D. V. P. KLYUCHINSKY*

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi

*E-mail: vlad240394@mail.ru

This study presents a comprehensive investigation of the thermodynamic properties of low-boiling working fluids used in turbine installations operating on the Organic Rankine Cycle (ORC). Special attention is given to analyzing key parameters that affect the efficiency of energy equipment, including the physicochemical properties of working fluids and their operational characteristics. The research involved a detailed thermodynamic analysis of more than thirty different low-boiling compounds. For each working fluid, the following parameters were determined: environmental safety indicators (ozone depletion potential and global warming potential), critical state parameters, specific heat of condensation, as well as optimal pressure values in the condenser and at the turbine inlet. The accuracy of the obtained results is confirmed by a minimal calculation error not exceeding 10%. Of particular scientific value are the identified correlations between exergetic efficiency and key working fluid parameters. Specifically, it was found that maximum efficiency is achieved when using substances with minimal critical pressure and maximum specific heat of condensation. Graphical dependencies clearly demonstrate the influence of temperature and pressure at the turbine inlet on the system's exergetic efficiency. The obtained

results allow for the development of a scientifically grounded methodology for the preliminary selection of working fluids for ORC turbine systems operating in the temperature range of 100–300 °C. The practical significance of this research lies in its potential to optimize energy equipment parameters and improve thermal energy conversion efficiency. The findings can be applied in the design of modern energy systems, contributing to the advancement of energy-saving technologies and the reduction of environmental impact.

Keywords: turbine installation, low-boiling working fluid, optimization, exergetic efficiency, thermophysical properties, efficiency, refrigerant, critical parameters.

Article info:

Received 24/06/2025, approved after reviewing 05/08/2025, accepted 22/08/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-28-34

Article in Russian

For citation:

Ovsyannik A. V., Klyuchinsky V. P. Low-boiling working fluids for turbine installations on the organic Rankine cycle. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 4. p. 28-34. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-4-28-34

Введение

Одной из современных тенденций в энергетике является развитие распределенной генерации, при которой электростанции малой мощности располагаются вблизи потребителей и подключаются либо напрямую к ним, либо к распределительным сетям. В этом контексте особую значимость приобретают турбоустановки на низкокипящих рабочих телах, что объясняется рядом преимуществ [1]–[4].

Их перспективность связана с возможностью работы при низких температурах теплоносителя, что позволяет эффективно использовать вторичные и возобновляемые энергоресурсы. Кроме того, такие установки отличаются простотой конструкции, доступной стоимостью, высокой надежностью и легкостью автоматизации.

Области применения турбоустановок на низкокипящих рабочих телах включают солнечную и геотермальную энергетику, утилизацию отходящего тепла, продуктов сгорания газотурбинных установок, а также вторичных энергоресурсов, широкодоступных на промышленных предприятиях. Они также эффективны при сжигании низкокалорийного топлива (щепа, биогаз, отходы и др.) и в системах когенерации, тригенерации и полигенерации [5]–[11].

В научной литературе преимущественно рассматриваются две схемы таких турбоустановок: без регенерации и с регенеративным теплообменником на выходе из турбины (рис. 1). Выбор схемы зависит от различных фак-

торов, включая начальные параметры системы и свойства рабочего тела. Исследования [12] показывают, что при прочих равных условиях схемы с регенеративными теплообменниками демонстрируют более высокие технико-экономические показатели [13]–[15].

Схема, изображенная на рис. 1, включает следующие компоненты: 1 — котел-утилизатор, 2 — турбина, 3 — генератор, 4 — конденсатор, 5 — насос, 6 — теплообменный аппарат.

Установка работает следующим образом: насос подает жидкое рабочее тело из конденсатора в теплообменник (в случае регенеративной схемы), где оно нагревается паром из турбины. Затем вещество поступает в котел-утилизатор, где происходит его нагрев, испарение и перегрев. После этого пар направляется в турбину, вращая ее вал и связанный с ним электрогенератор. Отрабатанный пар охлаждается в теплообменнике (при регенерации) и возвращается в конденсатор для завершения цикла.

Постановка задачи

В связи со значительным увеличением интереса к турбоустановкам, использующим низкокипящие рабочие тела, возникает потребность в анализе и подборе наиболее перспективных хладагентов для таких систем.

Выбор оптимального низкокипящего рабочего тела для турбоустановки представляет собой нетривиальную задачу [16]–[19]. При этом необходимо учитывать ряд ключевых характеристик:

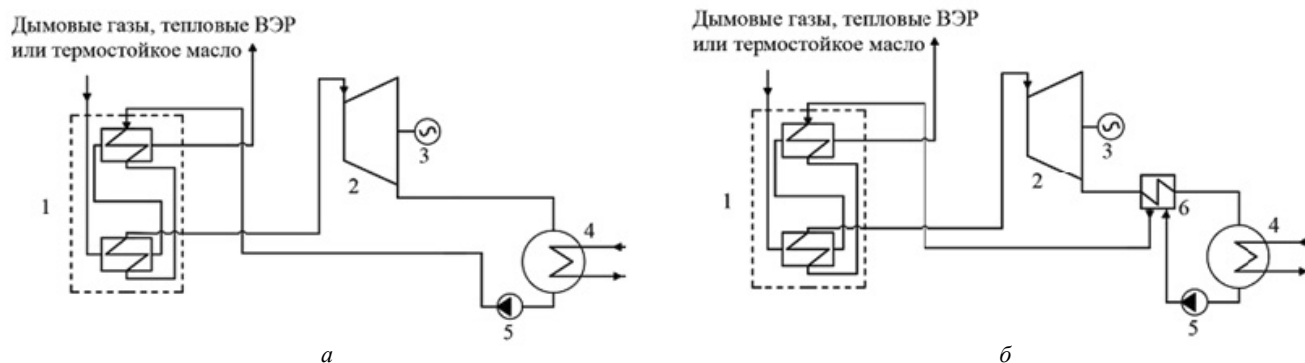


Рис. 1. Схемы турбоустановок: а — без регенерации; б — с регенерацией

Fig. 1. Turbine installations: a — without regeneration; b — with regeneration

- параметры, влияющие на безопасность людей и экологию;
- термодинамические свойства (критические параметры, температура кипения, теплота парообразования и др.);
- физико-химические свойства (химическая стабильность, плотность, растворимость, вязкость и т. д.).

Особую важность при выборе рабочего тела имеет его термодинамическая эффективность. В отличие от остальных характеристик, данные о которых доступны в справочниках, оценка термодинамической эффективности требует более сложного анализа.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с методикой, предложенной в исследовании [20], на основании исходных параметров, представленных в табл. 1, были рассчитаны и графически представлены зависимости эксергетического КПД от начальных термодинамических параметров — температуры и давления — для рабочего тела R236ea (рис. 2). Проведенный анализ полученных данных показал, что указанные зависимости формируют в координатном пространстве характерную поверхность, обладающую рядом локальных экстремумов (максимумов), положение которых существенно зависит от температурного режима. Примечательно, что аналогичные нелинейные зависимости с наличием экстремальных значений наблюдаются и при исследовании термодинамических характеристик других низкокипящих рабочих тел, что свидетельствует об общности выявленных закономерностей для данного класса веществ.

Как продемонстрировано в исследовании [21], при оптимальных термодинамических давлениях ранжирование рабочих тел по величине эксергетического КПД в зависимости от температуры остаётся неизменным во всем изученном диапазоне (100–300 °С). Это наблюдение свидетельствует о том, что вещество, показываю-

щее максимальную эффективность преобразования энергии при определенной температуре, неизменно сохраняет свои лидирующие позиции на протяжении всего исследуемого температурного спектра. Полученные результаты имеют существенное практическое значение: они позволяют упростить процедуру сравнительного анализа термодинамических характеристик различных рабочих тел в турбинных установках. В частности, проведение оценки при единственной репрезентативной температуре дает вполне достоверные результаты, экстраполируемые на весь рассматриваемый температурный диапазон. Такое упрощение методики анализа не только сокращает временные затраты на исследования, но и сохраняет высокую достоверность получаемых выводов.

С использованием разработанного программного обеспечения [20] выполнено моделирование работы турбоустановки на озонобезопасных низкокипящих рабочих телах, характеризующихся относительно низким потенциалом глобального потепления, при температуре 250 °С. Полученные данные систематизированы в табл. 2. Для анализа рабочие вещества были классифицированы по стоимости на три категории: низкая (Н), средняя (С) и высокая (В).

Представив линию оптимальных значений эксергетического КПД от начальной температуры в двухмерном формате (рис. 3) видно, что данная зависимость имеет форму кривой, которую можно математически представить в виде полинома:

$$y(x) = A \cdot x^2 + B \cdot x + C,$$
 (1)

где *A*, *B*, *C* — коэффициенты, ед.

Проведенные ранее исследования [22] показали, что критическое давление и удельная теплоты конденсации рабочего тела оказывают влияние на эффективность работы турбоустановок и эту зависимость можно математически описать формулой:

Таблица 1
Исходные данные для расчета турбоустановки

Data for turbine installation design	
Исходные данные	Значение
КПД насоса	80%
КПД турбины, котла-утилизатора, теплообменника	98%
КПД генератора	97%
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора	25 °С
Параметры окружающей среды: — температура — давление	15 °С 101,3 кПа
Значение температуры вторичных энергетических ресурсов в момент поступления в котел-утилизатор	300 °С
Предельно допустимое температурное значение рабочего вещества на входе в турбину	250 °С

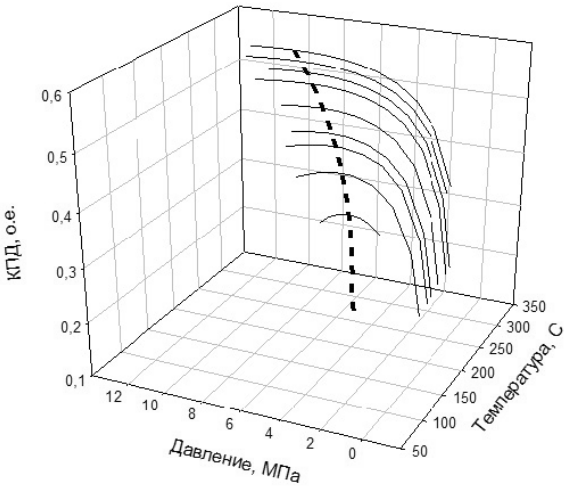


Рис. 2. Зависимость эксергетического КПД турбоустановки от начальных параметров рабочего тела

Fig. 2. Dependence of the exergy efficiency of a turbine installation on the initial parameters of the working fluid

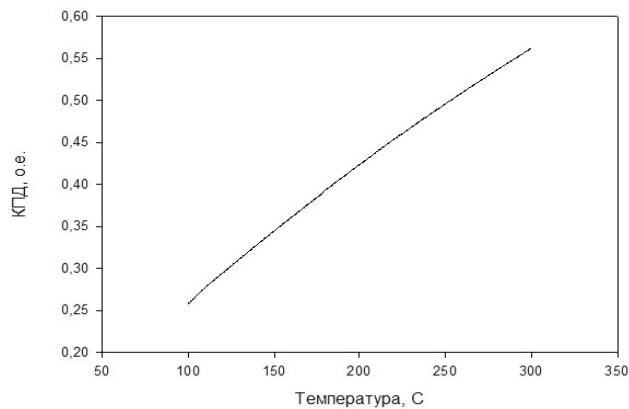
Таблица 2

Исследуемые рабочие тела

Table 2

Working fluids under investigation

Рабочее тело	ОРП	ПГП (100 лет)	Критические параметры		L_k , кДж/кг	$P_{опт}$, МПа	$P_{н. \text{ конд.}}$, ·10 ⁵ Па	КПД _{экс.} , %	Стоимость
			$T_{кр}$, °C	$P_{кр}$, МПа					
Однокомпонентные хладагенты									
R134A	0	1360	101,1	4,1	177,8	10,4	6,7	47,0	С
R152A	0	124	113,3	4,5	279,4	9,0	6,0	46,6	С
R236EA	0	1370	139,3	3,5	155,6	6,8	2,1	49,6	С
R245FA	0	1030	154,0	3,7	190,3	6,0	1,5	50,0	С
R32	0	674	78,1	5,8	270,9	13,5	16,9	42,6	С
R1234YF	0	4	94,7	3,4	145,4	9,8	6,8	48,0	В
R1234ZE (E)	0	6	109,4	3,6	166,9	9,0	5,0	47,6	В
R1234ZE (Z)	0	1,4	150,1	3,5	206,0	5,5	1,8	49,4	В
Смесевые хладагенты									
R407A	0	2100	82,3	4,5	171,1	12,9	12,5	45,1	С
R407C	0	1700	86,0	4,6	188,4	12,6	11,9	44,9	С
R407D	0	1600	91,4	4,5	188,2	11,9	10,1	45,3	С
R407E	0	1500	88,5	4,7	200,8	12,4	11,5	44,8	С
R410A	0	2100	71,4	4,9	190,6	14,1	16,6	44,5	С
R413A	0	2000	96,6	4,0	156,1	10,9	7,8	46,5	С
R417A	0	2300	87,1	4,0	140,1	11,9	9,8	46,2	С
R422B	0	2500	83,2	4,0	135,1	12,2	10,6	46,1	С
R423A	0	2200	99,1	3,6	148,7	10,1	6,1	47,5	С
R424A	0	2400	85,9	4,0	137,8	12,0	10,0	46,1	С
R425A	0	1500	93,9	4,5	204,3	11,6	9,7	45,3	С
R426A	0	1400	99,8	4,1	174,1	10,6	7,1	46,8	С
R427A	0	2200	85,3	4,4	176,4	12,3	11,4	45,3	С
R429A	0	21	127,1	5,2	345,3	8,9	5,9	47,9	С
R430A	0	120	107,0	4,1	271,3	9,3	6,5	47,5	С
R431A	0	46	100,3	4,9	297,6	10,8	10,0	47,3	С
R435A	0	30	125,1	5,4	368,5	9,1	6,1	47,1	С
R437A	0	1700	95,9	4,1	160,0	11,0	8,0	46,5	С
Природные хладагенты									
Диоксид углерода	0	1	31,0	7,4	119,65	21,9	64,3	38,9	Н
Аммиак	0	0	132,3	11,3	1165,78	13,0	10,1	39,9	Н
Пропан	0	3	96,7	4,3	335,73	10,5	9,5	47,5	Н
Изобутан	0	3	134,7	3,6	328,92	7,0	3,5	50,3	Н
Бутан	0	3	152,0	3,8	361,48	6,0	2,4	50,6	Н
Бутен	0	2	146,1	4,0	360,4	6,3	3,0	49,6	Н
Изобутен	0	3	144,9	4,0	358,9	6,5	3,0	49,6	Н
Изопентан	0	2	187,2	3,4	332,5	4,1	0,9	52,9	Н
Пентан	0	11	196,6	3,4	366,3	3,8	0,7	53,1	Н
Пропилен	0	3	91,1	4,6	334,9	10,8	11,5	46,0	Н



$$\eta = A \cdot P_{кр}^x \cdot L_k^y.$$
 (2)

где A , x , y — коэффициенты, ед.
На основании полученных результатов, на примере R236EA и результатов, полученных аналогичным образом для других низкокипящих рабочих тел, были опре-

Рис. 3. Зависимость эксергетического КПД турбоустановки от начальной температуры рабочего тела

Fig. 3. Dependence of the exergy efficiency of a turbine installation on the initial temperature of the working fluid

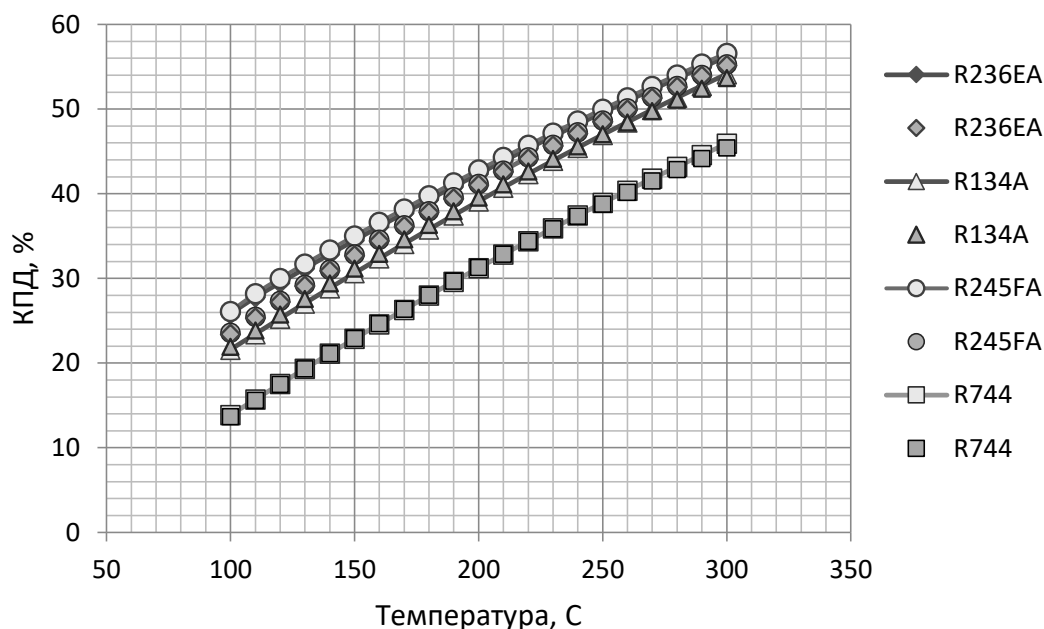


Рис. 4. Полученные различными способами кривые зависимости эксергетического КПД турбоустановки от начальной температуры рабочих тел

Fig. 4. Curves showing the dependence of the exergy efficiency of a turbine installation on the initial temperature of the working fluids, obtained by various methods

делены коэффициенты A , B и C , и тогда формула (1) принимает вид:

$$\eta = \left(\frac{7,5 \cdot L_{\text{к}}^{0,072}}{P_{\text{кр}}^{0,277}} \right) - 0,000175 \cdot t^2 + 0,229 \cdot t - 45,95. \quad (3)$$

Результаты расчетов, полученные по зависимости (3) и отображенные на рис. 4 сплошными линиями, были сопоставлены с данными, рассчитанными по методике из работы [20] (маркерные точки). Погрешность проведенных расчетов не превышала 10%.

Установленная зависимость имеет практическое значение для:

- оценки эффективности турбоустановок, работающих на сверхкритических параметрах низкокипящих рабочих тел;
- предварительного расчета выработки электроэнергии;
- анализа экономических показателей работы турбоустановок;
- первичного отбора термодинамически эффективных рабочих тел для сверхкритических систем.

Анализ полученных данных показывает, что максимальной термодинамической эффективностью обладают рабочие тела с минимальным критическим давлением и максимальной удельной теплотой конденсации.

Заключение

Исследование посвящено анализу термодинамической эффективности низкокипящих рабочих тел в турбоустановках с органическим циклом Ренкина. В ходе работы выявлена корреляция между эффективностью системы и тремя ключевыми параметрами: критическим

давлением, удельной теплотой конденсации и температурой рабочего тела.

Проведенный комплексный анализ позволил выявить ряд ключевых закономерностей, имеющих важное значение для проектирования энергетических установок.

1. Факторы максимальной термодинамической эффективности.

Наибольшие показатели эффективности рабочих процессов достигаются при сочетании двух определяющих параметров:

- минимальных значений критического давления рабочего тела;
- максимально возможных величин удельной теплоты конденсации.

2. Практическое применение установленных закономерностей.

Полученные результаты создают научную основу для:

- разработки методики предварительного отбора рабочих тел;
- оптимизации параметров сверхкритических турбоустановок;
- сокращения времени и ресурсов на проектные работы.

Особое значение имеет подтвержденная возможность применения данных закономерностей в широком температурном диапазоне (100–300 °C), что охватывает большинство практических случаев эксплуатации энергетического оборудования малой мощности.

Выявленные в ходе работы закономерности создают широкие возможности для продолжения научных изы-

сканий в данном направлении. В первую очередь, представляет значительный интерес более детальное изучение поведения рабочих тел в условиях, выходящих за рамки рассмотренного температурного диапазона. Это позволит не только расширить область применения полученных результатов, но и выявить возможные границы применимости установленных зависимостей.

Особого внимания заслуживает вопрос о влиянии на эффективность работы системы дополнительных параметров, которые не рассматривались в рамках настоящего исследования. Комплексный анализ этих факторов может привести к уточнению существующих моделей и разработке более совершенных методик расчета.

Важным направлением дальнейшей работы является создание универсальных критериев оценки рабочих тел, которые учитывали бы весь комплекс их термодинамических характеристик. Разработка такой системы критериев позволит существенно упростить процесс выбора оптимального рабочего тела для конкретных условий эксплуатации и значительно повысить эффективность проектирования энергетических установок.

Таким образом, проведенное исследование не только дает конкретные практические результаты, но и формирует прочную основу для последующих научных исследований в этой актуальной области энергетики.

Литература

1. Налбандян Г. Г., Жолнерчик С. С. Ключевые факторы эффективного применения технологий распределенной генерации в промышленности. // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 1. С. 80–87. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-1-80-87>
2. Илюшин П. В. Системный подход к развитию и внедрению распределенной энергетики и возобновляемых источников энергии в России. // Энергетик. 2022. № 4. С. 20–27. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.54.87.004>
3. Киушкина В. Р. Возобновляемые источники энергии в распределенной генерации малой энергетики // Молодой ученый. 2016. № 26 (130). С. 45–47.
4. Филиппченкова Н. С. Перспективы развития распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии в рамках концепции «интернет-энергии» // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: Материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 21–22 октября 2020 г. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. С. 387–390.
5. Степанец А. А. Энергосберегающие турбодетандерные установки / под ред. А. Д. Трухня. М.: Недра — Бизнес-центр, 1999. 258 с.
6. Агабабов В. С. Оценка эффективности использования детандер — генераторных агрегатов для получения электроэнергии. // Энергосбережение и водоподготовка. 2001. № 2. С. 13–18.
7. Трухний А. Д. Термодинамические основы использования утилизационных турбодетандерных установок. // Вестник МЭИ. 1999. № 5. С. 62–66.
8. Шадек Е. Г. и др. Тригенерационный энергокомплекс на низкокипящих рабочих телах. // Энергосбережение. 2015. № 5. С. 58–72.
9. Овсянник А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. № 62 (1). С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>
10. Овсянник А. В. и др. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода. // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2019. № 2. С. 41–51.
11. Velez F. et. al. Technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No. 6. P. 4175–4189. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.022

References

1. Nalbandyan G. G., Zholnerchik S. S. Technologies for Distributed Generation: key performance factors for industrial application. *Strategic decisions and risk management*. 2018. No 1. P. 80–87. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-1-80-87> (in Russian)
2. Ilyushin P. V. A systems approach to the development and implementation of distributed energy and renewable energy sources in Russia. *Power Engineer*. 2022. No. 4. P. 20–27. (in Russian)
3. Kiushkina V. R. Renewable energy sources in distributed generation of small-scale energy. *Young scientist*. 2016. No. 26 (130). P. 45–47. (in Russian)
4. Filippchenkova N. S. Prospects for the Development of Distributed Generation Based on Renewable Energy Sources within the Framework of the “Internet Energy” Concept. Dispatching and Control in Electric Power Industry: Proceedings of the XV All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference, Kazan, October 21–22, 2020 — Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2020. Pp. 387–390. (in Russian)
5. Stepanets A. A. Energy-Saving Turbo-Expander Units / edited by A. D. Trukhniy. Moscow: Nedra-Business Center, 1999. 258 p. (in Russian)
6. Agababov V. S. Evaluation of the Efficiency of Using Expander–Generator Units to Generate Electricity. *Energy Saving and Water Treatment*. 2001. No. 2. P. 13–18. (in Russian)
7. Trukhniy A. D. Thermodynamic principles of using waste-to-energy turboexpander units. *Bulletin of MPEI*. 1999. No. 5. P. 62–66. (in Russian)
8. Shadek E. G. et al. Trigeneration power complex on low-boiling working fluids. *Energy saving*. 2015. No. 5. P. 58–72. (in Russian)
9. Ovsyannik A. V. Turboexpander unit on carbon dioxide with production of liquid and gaseous carbon dioxide. *Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2019. No. 62 (1). P. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian)
10. Ovsyannik A. V. et al. Trigeneration of energy in turboexpander units on carbon dioxide. *Bulletin of GGTU named after P. O. Sukhoi*. 2019. No. 2. P. 41–51. (in Russian)
11. Velez F. et. al. Technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No. 6. P. 4175–4189. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.022
12. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. Thermodynamic analysis and optimization of low-boiling fluid parameters in a turboexpander. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1683. № 042005. DOI: 10.1088/1742–6596/1683/4/042005

12. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. Thermodynamic analysis and optimization of low-boiling fluid parameters in a turboexpander. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. № 042005. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/4/042005
13. Quoilin S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 168–186. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.028
14. Yu G. et al. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). // Energy. 2013. Vol. 51. P. 281–290. DOI: 10.1016/j.energy.2012.10.054
15. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 51. P. 711–722. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.10.017
16. Федосов С. В. Анализ и выбор экологически безопасных хладагентов для систем теплоснабжения зданий воздушными тепловыми насосами / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева // «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение». 2020. № 1. С. 120–129.
17. Цветков О. Б. и др. Синтетические холодильные агенты, регулируемые Киотским протоколом. // Холодильная техника. 2015. № 4. С. 1–8.
18. Цветков О. Б. Холодильные агенты: монография. СПб.: СПбГУНиПТ, 2004. 212 с.
19. Холодильные машины: учебник для вузов / Бараненко А. В., Бухарин Н. Н., Пекарев В. И., Тимофеевский Л. С.; ред. Тимофеевский Л. С. — 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2006. 941 с.
20. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке. // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2020. № 3/4. С. 108–115.
21. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. № 6 (63). С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>
22. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Влияние теплофизических свойств хладагентов на термодинамическую эффективность органического цикла Ренкина. // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2021. № 4. С. 100–105.
13. Quoilin S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P. 168–186. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.028
14. Yu G. et al. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). *Energy*. 2013. Vol. 51. P. 281–290. DOI: 10.1016/j.energy.2012.10.054
15. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 51. P. 711–722. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.10.017
16. Fedosov S. V. Analysis and selection of environmentally friendly refrigerants for heating systems of buildings with air heat pumps / S. V. Fedosov, V. N. Fedoseyev, I. A. Zaitseva. *Modern science-intensive technologies. Regional supplement*. 2020. No. 1. P. 120–129. (in Russian)
17. Tsvetkov O. B. et al. Synthetic refrigerants regulated by the Kyoto Protocol. *Refrigeration engineering*. 2015. No. 4. P. 1–8. (in Russian)
18. Tsvetkov O. B. Refrigerating agents: a monograph. St. Petersburg: SPbGUNiPT, 2004. 212 p. (in Russian)
19. Refrigerating machines: a textbook for universities / Baranenko A. V., Bukharin N. N., Pekarev V. I., Timofeevsky L. S.; ed. Timofeevsky L. S. — 2nd ed., revised St. Petersburg: Polytechnic, 2006. 941 p. (in Russian)
20. Ovsyannik A. V. Development of a computer program for optimizing the parameters of a low-boiling working fluid in a turboexpander unit / A. V. Ovsyannik, V. P. Klyuchinsky. *Bulletin of the Sukhoi State Technical University*. 2020. No. 3/4. P. 108–115. (in Russian)
21. Ovsyannik A. V. Thermodynamic analysis of ozone-safe low-boiling working fluids for turboexpander units / A. V. Ovsyannik, V. P. Klyuchinsky. *Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2020. No. 6 (63). P. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian)
22. Ovsyannik A. V., Klyuchinsky V. P. Influence of thermophysical properties of refrigerants on the thermodynamic efficiency of the organic Rankine cycle. *Bulletin of GGTU named after P. O. Sukhoi*. 2021. No. 4. P. 100–105. (in Russian)

Сведения об авторах

Овсянник Анатолий Васильевич

Д. т. н., профессор, профессор кафедры «Промышленная энергетика и экология», Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Республика Беларусь, av.ovsyannik@mail.ru. Scopus Author ID: 15069716600, ORCID: 0000-0002-5414-8364

Ключинский Владислав Петрович

К. т. н., ассистент кафедры «Промышленная энергетика и экология», Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Республика Беларусь, vlad240394@mail.ru. Scopus ID: 57221131552, ORCID: 0000-0002-3172-0751

Information about authors

Ovsyannik Anatoly V.

D. Sc., professor, professor of the Department of Industrial Power Engineering and Ecology of the Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus, 246746 Gomel, October Ave., 48, av.ovsyannik@mail.ru. Scopus Author ID: 15069716600, <https://orcid.org/0000-0002-5414-8364>

Klyuchinsky Vladislav P.

Ph. D., assistant of the Department of Industrial Power Engineering and Ecology of the Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus, 246746 Gomel, October Ave., 48, vlad240394@mail.ru. Scopus ID: 57221131552, ORCID: 0000-0002-3172-0751



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»