

УДК 658.261:621.56

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХЛАДАГЕНТОВ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

А. В. ОВСЯННИК, В. П. КЛЮЧИНСКИЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Исследовано влияние теплофизических свойств низкокипящих рабочих тел на эксергетическую эффективность органического цикла Ренкина при термодинамически оптимальных параметрах. Представлены результаты эксергетической эффективности ряда озонобезопасных низкокипящих рабочих тел. Установлено, что оптимальные параметры рабочего тела для всех исследуемых рабочих тел лежат в области сверхкритических значений. Показано, что оптимальное давление рабочего тела находится в зависимости от критического давления (чем выше критическое давление рабочего тела, тем выше его термодинамически оптимальное давление). Установлено, что на эффективность органического цикла Ренкина при термодинамически оптимальных параметрах оказывают влияние критическое давление и удельная теплота конденсации рабочего тела, что позволяет производить предварительную оценку эффективности рабочих тел для турбоустановок на органическом цикле Ренкина.

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

EFFECT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES THERMODYNAMIC REFRIGERANTS ORGANIC CYCLE EFFICIENCY RENKINA

A. V. OVSYANNIK, V. P. KLYUCHINSKY

*Educational institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The influence of thermophysical properties of low-boiling working bodies on the exergetic efficiency of the organic Rankine cycle at thermodynamically optimal parameters has been investigated. The article presents results of exergetic efficiency of a number of ozone-safe low-boiling working bodies. It is established that optimal parameters of the working body for all investigated working bodies lie in the area of supercritical values. It has been shown that the optimum pressure of the working body is a function of the critical pressure (the higher the critical pressure of the working body, the higher its thermodynamically optimum pressure). It is established that the efficiency of Rankine's organic cycle at thermodynamically optimal parameters is influenced by critical pressure and specific heat of condensation of working body which allows to make preliminary estimates of efficiency of working bodies for turbine units on the Rankine's organic cycle.

Keywords: organic Rankine cycle, low-boiling working body, optimization, exergy efficiency, thermophysical properties, efficiency, refrigerant, critical parameters.

Введение

Все более широкое применение в малой энергетике находят схемы на органическом цикле Ренкина (ОЦР) (рис. 1) [1]–[8], в котором в качестве рабочих тел обычно используются органические вещества (класс соединений, в состав которых входит углерод, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов) с более низкой, чем у воды, температурой кипения. Наиболее перспективными областями применения ОЦР установок служат: солнечная и геотермальная энергетика, утилизация теп-

ловых отходов, продуктов сгорания газотурбинных установок, утилизация вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, а также сжигание топлива с низкой теплотворной способностью (щепа, биогаз, мусор и т. д.) [9], [10].

Применение ОЦР обусловлено следующими его достоинствами: довольно низкие допустимые температуры низкокипящего рабочего тела (НКРТ) перед турбиной, простота конструкции ОЦР установок, низкая стоимость, высокая надежность, простота автоматизации, невысокая скорость вращения турбины и т. д.

Установки такого типа могут применяться не только в рамках когенерации, но и в тригенерационных схемах для производства электричества, тепла и холода, а источником энергии в них могут служить высокотемпературные ВЭР [1], [5], [10], [11].

Цель работы – установить влияние теплофизических свойств низкокипящих рабочих тел на эффективность ОЦР при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела.

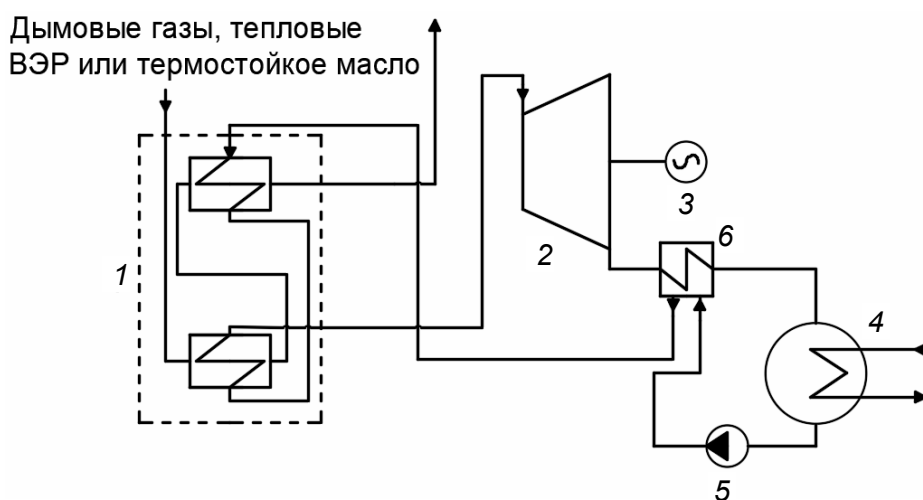


Рис. 1. Схема турбоустановки на ОЦР:
1 – котел-утилизатор; 2 – турбина на ОЦР; 3 – генератор; 4 – конденсатор;
5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Принцип работы схемы следующий: из конденсатора жидкое рабочее тело насосом подается в теплообменник, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, парообразуется и перегревается. Далее рабочее тело поступает в турбину, где совершает механическую работу по вращению вала турбины, связанного муфтой с генератором электрического тока. Затем НКРТ охлаждается в теплообменнике и поступает в конденсатор, где и конденсируется.

Постановка задачи

В настоящее время в ОЦР установках нашли широкое распространение наиболее простые схемы с субкритическими параметрами рабочего тела. Однако проведенные исследования [12]–[14] показали, что существуют термодинамически оптимальные параметры рабочего тела, лежащие в области сверхкритических значений, позволяющие добиться высокой эффективности такого рода установок. А оптимальные параметры и их эксергетическая эффективность значительно изменяются для различных рабочих тел, что свидетельствует о существенном влиянии теплофизических свойств рабочего тела на их эффективность. В работе [15] показано, что эффективность субкритического ОЦР зависит от критической температуры рабочего тела, однако можно предположить, что и другие теплофизические свойства оказывают зна-

чительное влияние на эффективность ОЦР. Таким образом, предложено установить влияние теплофизических свойств низкокипящих рабочих тел на эффективность ОЦР при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела.

Основная часть

По методике, представленной в [12], [14], и с исходными данными, представленными в таблице, проведен расчет эксергетической эффективности ОЦР при термодинамически оптимальных параметрах для различных озонобезопасных рабочих тел. По полученным результатам построены зависимости эксергетического КПД от оптимального и критического давления для различных озонобезопасных рабочих тел (рис. 2).

Исходные данные для расчета ОЦР

Исходные данные	Значение
КПД турбины, о. е.	0,82
КПД насоса, о. е.	0,80
КПД котла-утилизатора, о. е.	0,98
КПД теплообменника, о. е.	0,98
Механический КПД турбины, о. е.	0,98
КПД генератора, о. е.	0,97
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	25
Температура окружающей среды, °С	15
Атмосферное давление, кПа	101,325
Температура ВЭР на входе в котел-утилизатор, °С	300
Максимально допустимая температура рабочего тела перед турбиной, °С	250

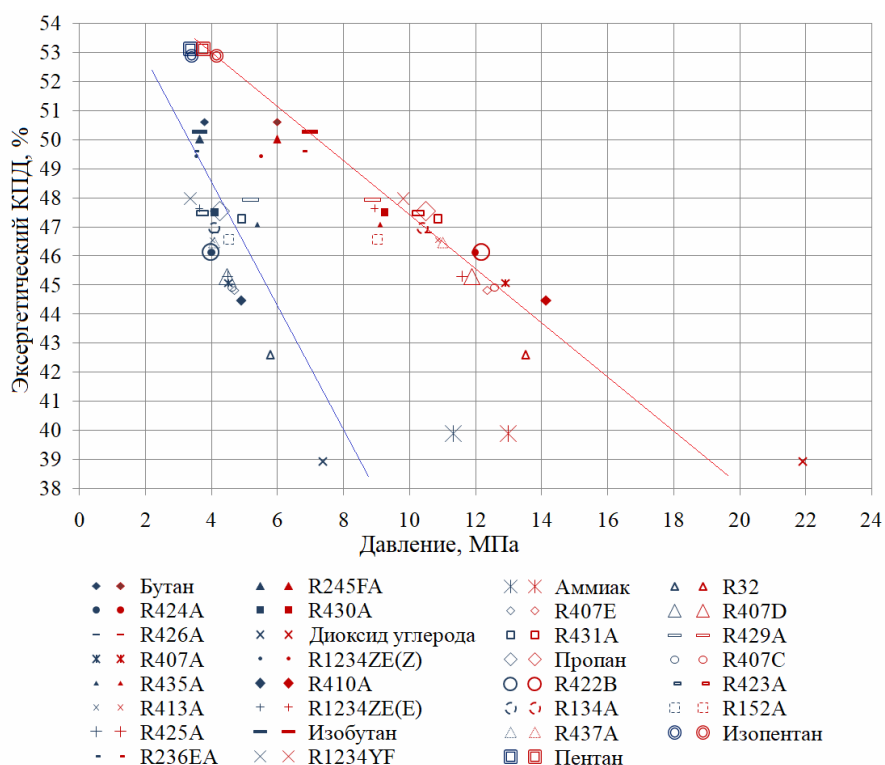


Рис. 2. Зависимость эксергетического КПД от оптимального и критического давления для различных низкокипящих рабочих тел

Из рис. 2 видно, что для всех исследуемых рабочих тел оптимальное давление лежит в области сверхкритических значений и зависит от критического давления для

данного рабочего тела (чем выше критическое давление, тем большим значением обладает термодинамически оптимальное давление). Также для всех рабочих тел характерно увеличение их эффективности со снижением критического и оптимального давления. Однако из рис. 2 и 3 можно заметить, что для рабочих тел с близкими значениями критических параметров данное утверждение не всегда справедливо, объясняется это влиянием других теплофизических свойств рабочего тела. К таким свойствам можно отнести удельную теплоту конденсации (рис. 3).

Построив эмпирическую зависимость эксергетического КПД от критического давления (рис. 2) и зависимость эксергетического КПД от удельной теплоты конденсации, видно, что удельная теплота конденсации оказывает влияние на эффективность рабочих тел. Таким образом, введя соответствующий коэффициент в виде степенной функции (рис. 4) можно повысить точность расчета эксергетического КПД.

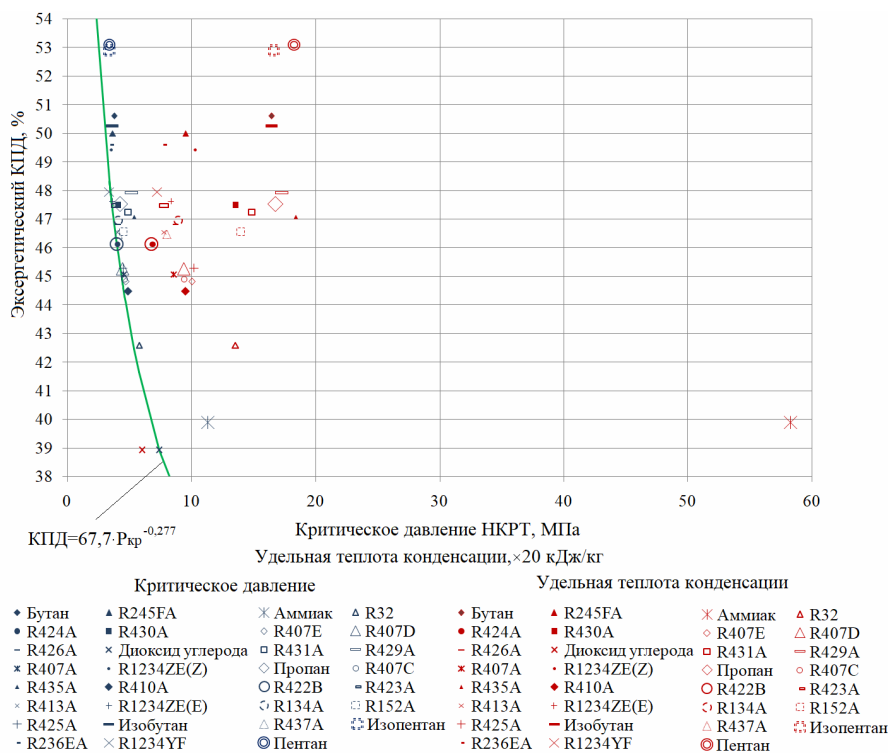


Рис. 3. Зависимость эксергетического КПД от критического давления и удельной теплоты конденсации для различных низкокипящих рабочих тел

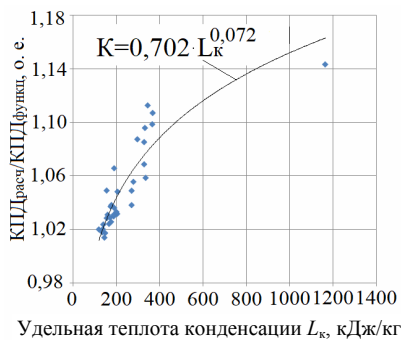


Рис. 4. Влияние удельной теплоты конденсации рабочих тел на эффективность ОЦР установки

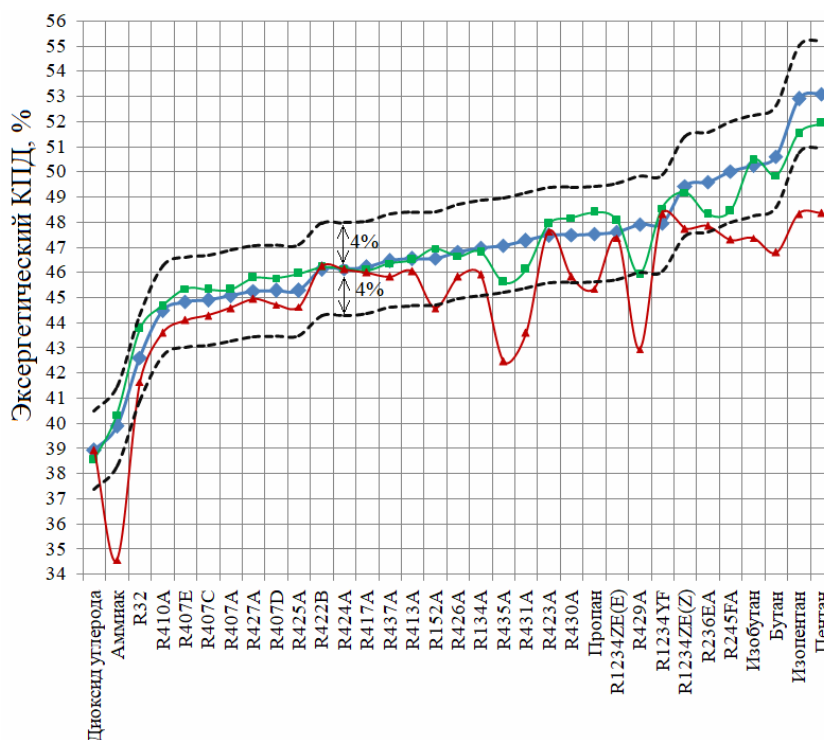


Рис. 5. Эффективность ОЦР установки, полученная расчетными и эмпирическим путями: — \square — $\text{КПД}_{\text{расч}}$; — \blacktriangle — $\text{КПД} = 67,7 \cdot P_{\text{кр}}^{-0,277}$; — \blacksquare — $\text{КПД} = 67,7 \cdot P_{\text{кр}}^{-0,277} \cdot K_{\text{кор}}$

На рис. 5 представлены зависимости эксергетического КПД от критического давления, полученные расчетным путем (по методике [12], [14]), эмпирическим путем без учета влияния удельной теплоты конденсации и эмпирическим путем с учетом удельной теплоты конденсации. Как видно из рис. 5, удельная теплота конденсации оказывает значительное влияние на эффективность некоторых рабочих тел, а введение коэффициента, учитывающего удельную теплоту конденсации, позволяет значительно увеличить точность получаемых результатов, что, в свою очередь, дает возможность судить об эффективности рабочего тела для ОЦР по нескольким общедоступным свойствам (критическая температура [15], критическое давление и удельная теплота конденсации).

Заключение

Установлено влияние теплофизических свойств (критического давления и удельной теплоты конденсации) на эффективность рабочего тела в сверхкритическом органическом цикле Ренкина. Так, с увеличением критического давления рабочего тела эффективность ОЦР при термодинамически оптимальных параметрах снижается, а с увеличением удельной теплоты конденсации — растет. Сравнивая низкокипящие рабочие тела по их теплофизическим свойствам (критической температуре, критическому давлению и удельной теплоте конденсации), можно определять рабочие тела, обладающие наиболее высокой термодинамической эффективностью для применения в ОЦР.

Литература

1. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. — 2019. — № 62 (1). — С. 77–87.

2. Trigeneration units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1683, № 042010.
3. Ho, T. Comparison of the Organic Flash Cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy / T. Ho, S. S. Mao, R. Greif // Energy. – 2012. – Vol. 42. – P. 213–223.
4. Ho, T. Increased power production through enhancements to the Organic Flash Cycle (OFC) / T. Ho, S. S. Mao, R. Greif // Energy. – 2012. – Vol. 45. – P. 686–695.
5. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.
6. Technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation / F. Velez [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, № 6. – P. 4175–4189.
7. Quoilin, S., Van Den Broekb M., Declaye S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. – Vol. 22. – P. 168–186.
8. Овсянник, А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2021. – № 1 (64). – С. 65–77.
9. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 2. – С. 99–124.
10. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4 (82, 83). – С. 108–115.
11. Овсянник, А. В. Термодинамическая оптимизация установки для производства углекислоты как элемента тригенерационной турбоустановки на органическом цикле Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 1 (84). – С. 61–68.
12. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ и оптимизация параметров вторичного перегрева в турбодетандерных установках на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. завед. и энергет. об-ний СНГ. – 2021. – № 2 (64). – С. 164–177.
13. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – № 6 (63). – С. 554–562.
14. Ovsyannik, A. V. Thermodynamic analysis and optimization of low-boiling fluid parameters in a turboexpander / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1683, № 042005.
15. Chen, H. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat / H. Chen, D. Y. Goswami, E. K. Stefanakos // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14. – P. 3059–3067.