

EDN: WXHCKY

УДК 621.48–68

Assessment of the Effect of Changes in the Operating Parameters of the Organic Rankine Cycle, with Changes in External

Denis I. Karabarin*

Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 25.10.2024, received in revised form 24.11.2024, accepted 05.12.2024

Abstract. *AIM.* To determine the effect of changes in external parameters on the operating parameters of the Rankine organic cycle technology. *METHODS.* The thermodynamic Rankine cycle on organic heat carriers was considered. The analysis of the operation of the technology for various working hoists is carried out, taking into account the model of complete and incomplete absorption of primary heat by the working fluid in the evaporator. *results.* A thermodynamic analysis of the operating parameters of the ORC on various working fluids with different parameters of heating and cooling media is presented. The ORC parameter is proposed, which takes into account the proportion of recovery of primary heat by the working fluid, depending on the internal parameters of the ORC. The regime and analytical dependences of saturation temperatures and efficiency depending on changes in external temperatures: heating and cooling media are presented. *Conclusion.* The choice of a working fluid for ORC installations is of the greatest interest, since it must take into account the efficiency of the installation, the proportion of primary heat recovery and the specific power generated. The efficiency of the ORC depends on the saturation and condensation temperatures, which in turn depends on the temperatures of the heating and cooling media. The dependence of the optimal saturation temperature on the temperature of the heating medium has a parabolic form. The dependence of the cycle efficiency on the saturation and condensation temperatures has a linear form, while the angle of inclination decreases with an increase in the saturation temperature.

Keywords: energy efficiency, low-potential heat, organic Rankine cycle.

Citation: Karabarin D.I. Assessment of the effect of changes in the operating parameters of the organic Rankine cycle, with changes in external. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(8), 1019–1027. EDN: WXHCKY



Оценка влияния изменения режимных параметров органического цикла Ренкина при изменении внешних

Д. И. Карабарин

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. *Цель.* Определить влияние изменения внешних параметров на режимные параметры работы технологии органического цикла Ренкина. *Методы.* Рассматривался термодинамический цикл Ренкина на органических теплоносителях. Произведен анализ работы технологии на различные рабочие тела с учетом модели полного и неполного поглощения первичной теплоты рабочим телом в испарителе. *Результаты.* Представлен термодинамический анализ режимных параметров работы ОЦР на различных рабочих жидкостях при разных параметрах греющей и охлаждающей сред. Предложен параметр ОПР, учитывающий долю восстановления первичной теплоты рабочим телом в зависимости от внутренних параметров ОЦР. Представлены режимные и аналитические зависимости температур насыщения и КПД в зависимости от изменения внешних температур: греющей и охлаждающей сред. *Заключение.* Выбор рабочего тела для установок ОЦР представляет наибольший интерес, так как он должен учитывать эффективность работы установки, долю восстановления первичной теплоты и удельную вырабатываемую мощность. Эффективность работы ОЦР зависит от температур насыщения и конденсации, которая, в свою очередь, зависит от температур греющей и охлаждающей сред. Зависимость оптимальной температуры насыщения от температуры греющей среды имеет параболический вид. Зависимость КПД цикла от температуры насыщения и конденсации имеет линейный вид, при этом при росте температуры насыщения угол наклона уменьшается.

Ключевые слова: энергоэффективность, низкопотенциальная теплота, органический цикл Ренкина.

Цитирование: Карабарин Д. И. Оценка влияния изменения режимных параметров органического цикла Ренкина, при изменении внешних / Д. И. Карабарин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(8). С. 1019–1027. EDN: WXHCKY

Обзор особенностей определения эффективности установок ОЦР

Как показано автором [1], потенциал утилизации бросного тепла уходящих газов в энергетике и промышленности составляет порядка 8 % от первичной энергии. Авторами [2, 3] показано, что технология ОЦР эффективно преобразует тепловую энергию в электрическую даже при температуре источника ниже 100 °С.

В последние годы ученые провели многочисленные исследования по анализу производительности и оптимизации ОЦР [4–12]. Большинство исследований были посвящены оценке зависимости мощности установок ОЦР от температуры насыщения (докритические и сверхкритические), конструкции ОЦР (цикл с рекуператором и без); вида рабочего тела – сухое или влажное (наклон пограничной кривой линии сухости $x=1$); перегрева. Исследования показали, что эффективность ОЦР для сухих тел при отсутствии перегрева и регенерации мало отличается от эффективности при перегреве и наличии регенерации, при этом для влажных рабочих тел влияние перегрева намного значительнее, поэтому более предпочтительно использование сухих рабочих тел [10, 11].

На оценку эффективности поглощения первичной теплоты рабочим телом ОЦР влияют: тип рабочего тела, параметры источника теплоты, температура окружающей среды и темпе-

Термический КПД установок ОЦР зависит только от рабочего тела и температуры насыщения. При этом видно, что чем ближе температура насыщения к критической, тем выше КПД. Большим термическим КПД обладают рабочие тела, в составе которых находится хлор, однако для полноценного анализа рабочего тела важно оценивать долю восстановленного тепла и удельную мощность, которые, в свою очередь, зависят от температуры греющей среды на входе и выходе.

Так, например, для источника теплоты в виде сетевой воды с температурами 150/70 °С наиболее эффективным является рабочее тело R 142b (рис. 3 и 4), для уходящих газов с параметрами 180/110 при температуре 130/70 °С – уже является рабочее тело R 1234ze(E) (рис. 5 и 6), а для более высоких 170/70 – рабочие тела R 600a и R 142b (рис. 7 и 8).

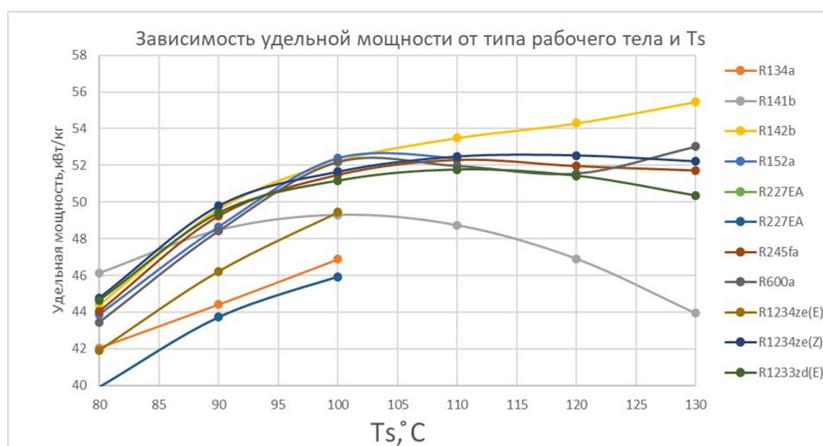


Рис. 3. Зависимость удельной мощности от типа рабочего тела и T_s

Fig. 3. Dependence of specific power on the type of working fluid and T_s

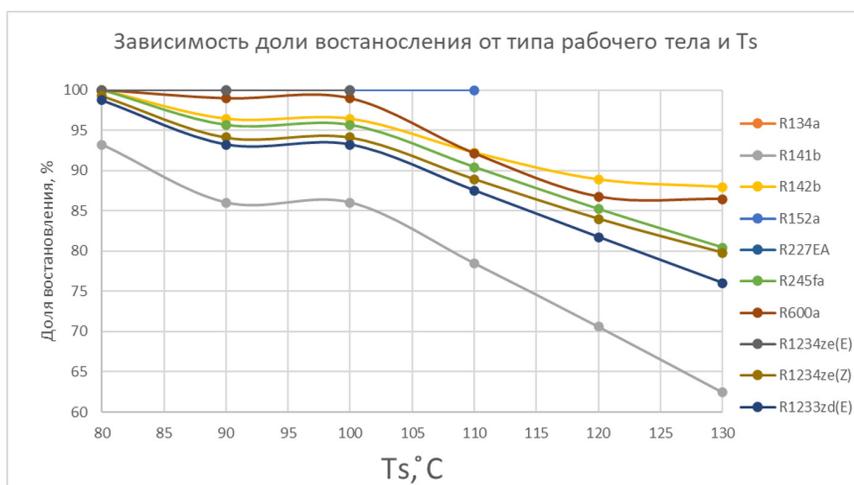


Рис. 4. Зависимость доли восстановления теплоты от типа рабочего тела и T_s при температуре источника 150/70 °С

Fig. 4. The dependence of the proportion of heat recovery on the type of working fluid and T_s at a source temperature of 150/70 °С

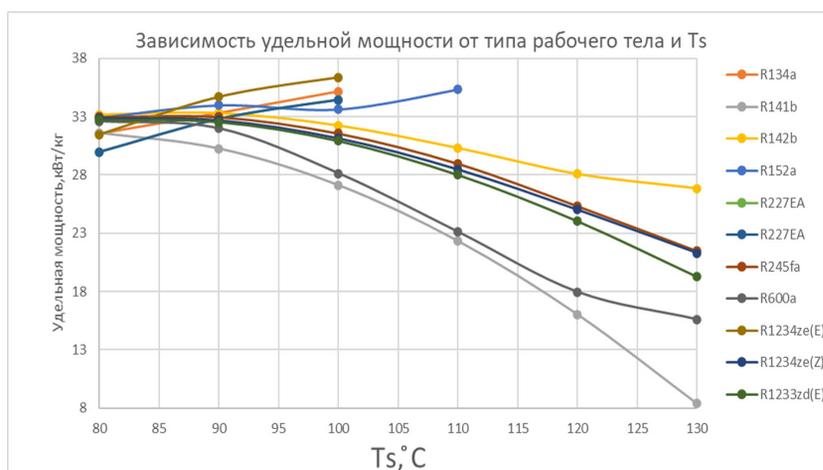


Рис. 5. Зависимость удельной мощности от типа рабочего тела и T_s при температуре источника 130/70 °C

Fig. 5. Dependence of specific power on the type of working fluid and T_s at a source temperature of 130/70 °C

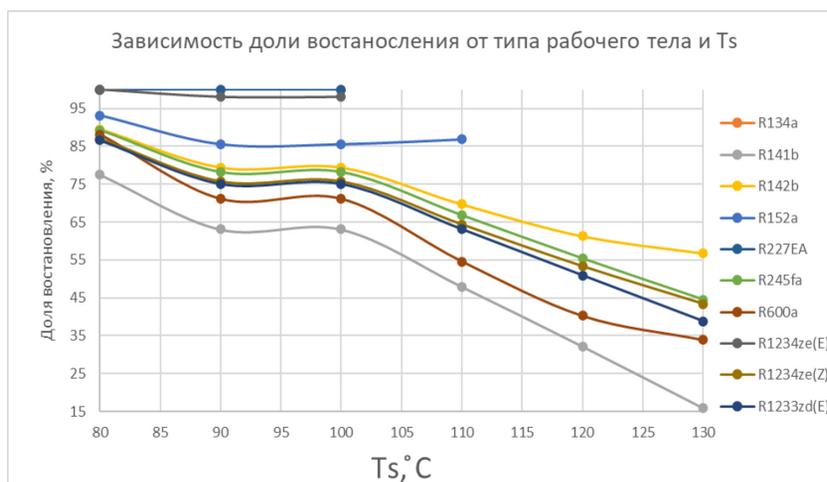


Рис. 6. Зависимость доли восстановления теплоты от типа рабочего тела и T_s при температуре источника 130/70 °C

Fig. 6. The dependence of the proportion of heat recovery on the type of working fluid and T_s at a source temperature of 130/70 °C

Так как установка ОЦР проектируется и работает на одном рабочем теле, анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным для всех температур является рабочее тело R 142b

Анализ режимных параметров установки ОЦР с рабочим телом R 142b

Несмотря на то что установка проектируется на фиксированное значение температуры греющей среды в процессе эксплуатации и отопительного сезона, она может меняться, что, в свою очередь, приводит к необходимости менять предельную температуру насыщения для

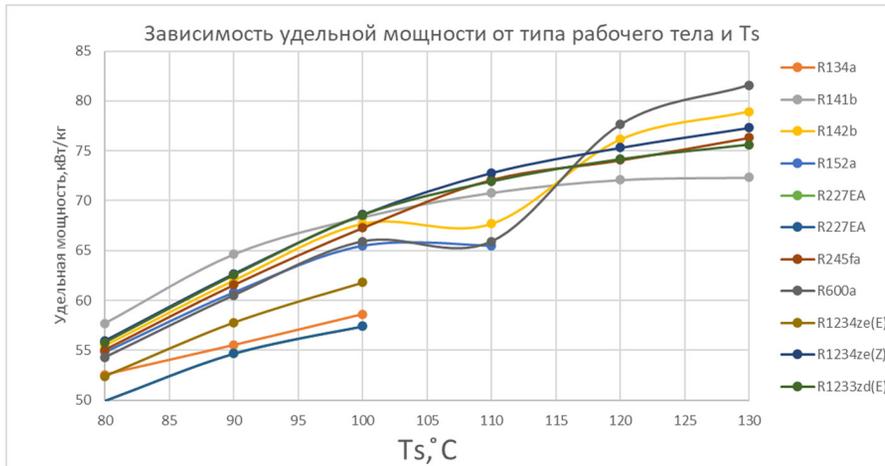


Рис. 7. Зависимость удельной мощности от типа рабочего тела и Ts при температуре источника 170/70 °С

Fig. 7. Dependence of specific power on the type of working fluid and Ts at a source temperature of 170/70 °С

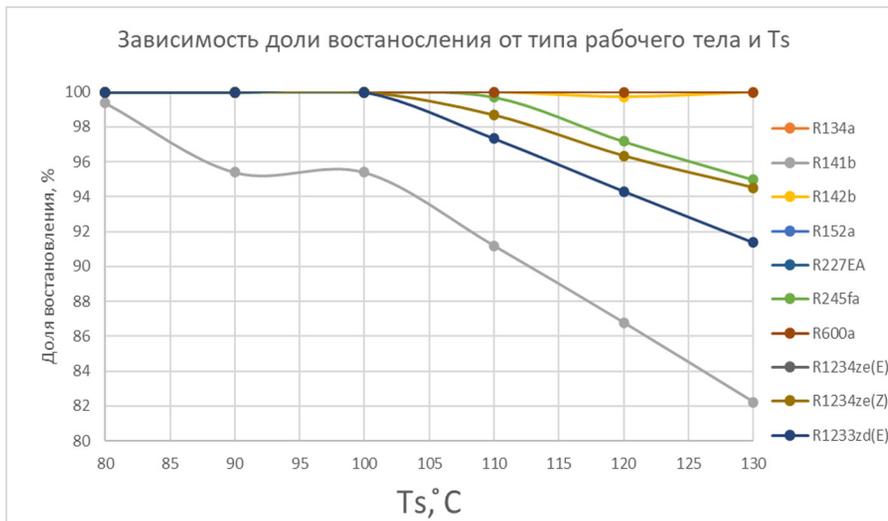


Рис. 8. Зависимость доли восстановления теплоты от типа рабочего тела и Ts при температуре источника 170/70 °С

Fig. 8. The dependence of the proportion of heat recovery on the type of working fluid and Ts at a source temperature of 170/70 °С

установки ОЦР, такая зависимость представлена на рис. 9, она имеет параболическую закономерность и может быть определена по уравнению:

$$T_s = 0,0064 * T_{\text{ист}}^2 - 1,0879 * T_{\text{ист}} + 111,41.$$

Также в процессе эксплуатации будет меняться температура охлаждающей воды, что, в свою очередь, будет менять температуру конденсации и эффективность работы цикла. Такая зависимость представлена на рис. 10, а линейные коэффициенты в табл. 1

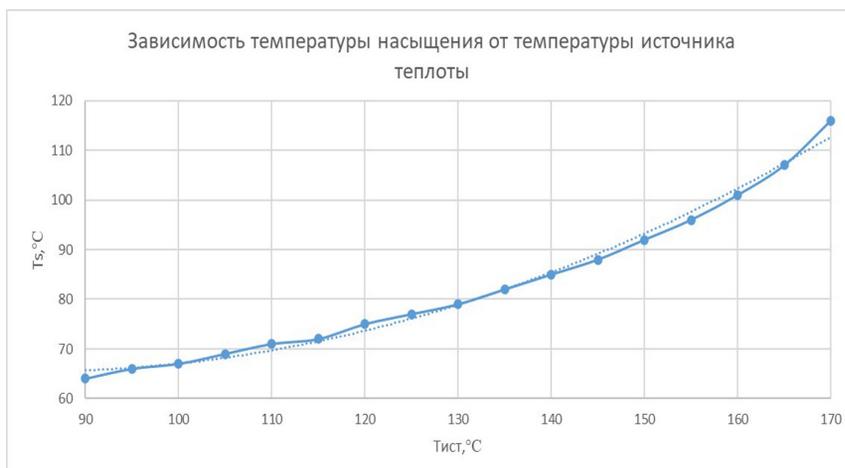


Рис. 9. Зависимость температуры насыщения от температуры источника теплоты

Fig. 9. Dependence of the saturation temperature on the temperature of the heat source

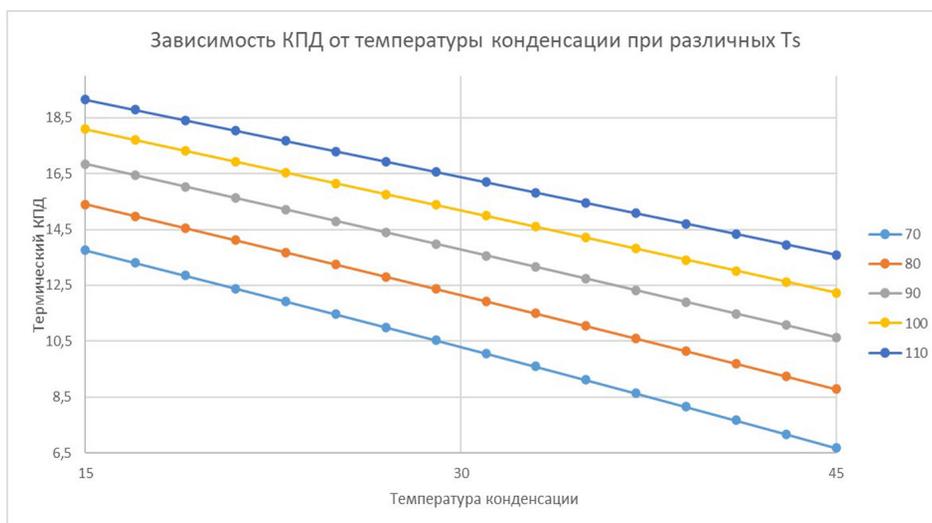


Рис. 10. Зависимость термического КПД от температуры конденсации для различных Ts

Fig. 10. Dependence of thermal efficiency on condensation temperature for different Ts

Таблица 1. Уравнения зависимости КПД от $T_{\text{конд}}$ при T_s от 70 до 110 °С

Table 1. Equations for the dependence of efficiency on $T_{\text{конд}}$ at T_s from 70 to 110 °С

T_s	Уравнение
70	$-0,2356 * T_{\text{конд}} + 17,341$
80	$-0,2201 * T_{\text{конд}} + 18,733$
90	$-0,2067 * T_{\text{конд}} + 19,96$
100	$-0,1954 * T_{\text{конд}} + 21,033$
110	$-0,1855 * T_{\text{конд}} + 21,937$

Выводы

- Выбор рабочего тела для установок ОЦР представляет наибольший интерес, так как он должен учитывать эффективность работы установки, долю восстановления первичной теплоты и удельную вырабатываемую мощность.
- Эффективность работы ОЦР зависит от температуры насыщения и конденсации, которая, в свою очередь, зависит от температур греющей и охлаждающей сред.
- Зависимость оптимальной температуры насыщения от температуры греющей среды имеет параболический вид.
- Зависимость КПД цикла от температуры насыщения и конденсации имеет линейный вид, при этом при росте температуры насыщения угол наклона уменьшается

Список литературы / References

- [1] Yin R. Y. Thoughts on the implementation path to a carbon peak and carbon neutrality in China's steel industry. R. Y. Yin, Z. D. Liu, F. Q. Shangguan. *Engineering*. 2021. 7. 1680–1683
- [2] Pilia R. Techno-economic potential of waste heat recovery from German energy intensive industry with organic Rankine cycle technology, *Renew. Sustain. R. Pilia, L. García Martínez, C. Wielandab, H. Spliethoff. Energy Review*. 2020. 134. 110324.
- [3] Chen Y. T. Effect of evaporator heat transfer process on selection of mixture and operating condition in ORC system. Chen, Y., Chen, Y., Xu, Y., Wang, L., Ye, S., Huang, W. *Huagong Xuebao CIESC Journal*. 2019. 70. 1723–1733.
- [4] Feng Y. Q. Effect of evaporator heat transfer process on selection of mixture and operating condition in ORC system. Chen, Y., Chen, Y., Xu, Y., Wang, L., Ye, S., Huang, W. *Huagong Xuebao CIESC Journal*. 2019. 70. 1723–1733.
- [5] Feng Y. Q. Parametric analysis and thermo-economical optimization of a Supercritical-Subcritical organic Rankine cycle for waste heat utilization. Y. Q. Feng, W. Zhang, H. Niaz, Z. X. He, S. Wang, X. Wang, Y. Z. Liu. *Energy Conversion and Management*. 2020. 212. 112773
- [6] Zhi L. H. Parametric analysis and optimization of transcritical-subcritical dual-loop organic Rankine cycle using zeotropic mixtures for engine waste heat recovery. L. H. Zhi, P. Hu, L. X. Chen, G. Zhao. *Energy Conversion and Management*. 2019. 195. 770–787
- [7] Zhi L. H. Thermodynamic analysis of a novel transcritical-subcritical parallel organic Rankine cycle system for engine waste heat recovery. L. H. Zhi, P. Hu, L. X. Chen, G. Zhao. *Energy Conversion and Management*. 2019. 197. 111855
- [8] Fang Y. W. Comparative analysis and multi-objective optimization of organic Rankine cycle (ORC) using pure working fluids and their zeotropic mixtures for diesel engine waste heat recovery. Y. W. Fang, F. B. Yang, H. G. Zhang. *Applied Thermal Engineering*. 2019. 157. 113704
- [9] Liao G. L. Advanced exergy analysis for Organic Rankine Cycle-based layout to recover waste heat of flue gas. G. L. Liao, J. Q. E, F. Zhang, J. W. Chen, E. W. Leng. *Apply Energy*. 2020. 266. 114891.
- [10] Tian Z. Energy, exergy, and economic (3E) analysis of an organic Rankine cycle using zeotropic mixtures based on marine engine waste heat and LNG cold energy. Z. Tian, W. J. Zeng, B. Gu, Y. Zhang, X. Yuan. *Energy Conversion and Management*. 2021. 228. 113657

[11] Ping X. Thermodynamic, economic, and environmental analysis and multi-objective optimization of a dual loop organic Rankine cycle for CNG engine waste heat recovery. X. Ping, B.F. Yao, H.G. Zhang, F.B. Yang. *Applied Thermal Engineering*. 2021. 193. 116980

[12] Ping X. Prediction and optimization of power output of single screw expander in organic Rankine cycle (ORC) for diesel engine waste heat recovery. X. Ping, F.B. Yang, H.G. Zhang, W.J. Zhang, J. Zhang, G.G. Song, C.Y. Wang, B.F. Yao, Y.T. Wu. *Applied Thermal Engineering*. 2021. 182. 116048

[13] Карабарин Д. И. Повышение эффективности утилизации низкопотенциальной энергии теплотехнологических установок: дис. Канд. Техн. Наук: 05.14.04. СФУ, Красноярск, 2021. 155. [Karabarin D.I. Improving the efficiency of utilization of low-potential energy of thermal technology installations: dis. Cand. Tech. Sciences: 05.14.04. SFU, Krasnoyarsk, 2021. 155 (In Rus.)]