

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА С ОПТИМАЛЬНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

В. А. Футин 

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева—КАИ,
Россия, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

 vafutin@kai.ru

Актуальным вопросом является повышение эффективности двигателей внутреннего сгорания за счет применения рекуперативного цикла Ренкина, позволяющего преобразовать тепловые потери в дополнительную полезную работу, что может привести к снижению расхода топлива и экономии ресурсов.

На основе анализа современной литературы было показано, что эффективность цикла Ренкина зависит от свойств рабочих веществ, реализующих цикл. В работе рассматривается влияние физических свойств рабочих веществ на эффективность рекуперативного цикла Ренкина. При этом все рабочие вещества разделены на три группы: одно—трехатомные, четырех—шестиатомные и с числом атомов больше шести. Каждой группе соответствует свой тип Т-S-диаграммы. Для каждой группы веществ разработана физическая и математическая модели физических свойств.

На основе моделей физических свойств были получены выражения для коэффициента полезного действия цикла Ренкина для указанных групп веществ. При этом были введены в рассмотрение безразмерные относительные и приведённые величины. Проведён численно-графический анализ зависимости коэффициента полезного действия цикла Ренкина от основных безразмерных величин. На основе проведённого анализа были выработаны рекомендации для выбора или синтеза оптимального рабочего вещества, реализующего цикл Ренкина.

Ключевые слова: цикл Ренкина, коэффициент полезного действия, теоретическое исследование, число атомов, температура, давление, рабочее вещество

Для цитирования: Футин В. А. Повышение эффективности силовых установок с рекуперацией тепла автомобильной техники на основе применения рабочего вещества с оптимальными физическими свойствами. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 2. С. 24–30. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-24-30>. EDN: XJVDCA.



© Футин В. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INCREASING THE EFFICIENCY OF POWER PLANTS WITH HEAT RECOVERY OF AUTOMOTIVE EQUIPMENT BY USING A WORKING SUBSTANCE WITH OPTIMAL PHYSICAL PROPERTIES

V. A. Futin 

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev—KAI,
K. Marks St., 10, Kazan, 420111, Russia

 vafutin@kai.ru

An urgent issue is to increase the efficiency of the internal combustion engine through the use of a Rankine regenerative cycle, which allows converting heat losses into additional useful work, which can lead to lower fuel consumption and resource savings.

Based on the analysis of modern literature, it has been shown that the effectiveness of the Rankine cycle depends on the properties of the working substances that implement the cycle. The paper examines the effects of the physical properties of working substances on the efficiency of the Rankine regenerative cycle. At the same time, all working substances are divided into three groups: 1–3 atomic, 4–6 atomic and with more than six atoms. Each group has its own type of T-S chart. Physical and mathematical models of physical properties have been developed for each group of substances.

Based on models of physical properties, expressions for the efficiency of the Rankine cycle for these groups of substances are obtained. Moreover, dimensionless relative and reduced values are introduced into consideration. The author provides a numerical and graphical analysis of the dependence of the efficiency of the Rankine cycle on the basic dimensionless quantities. Therefore, the author develops recommendations for the selection or synthesis of the optimal working substance implementing the Rankine cycle.

Keywords: Rankine cycle, efficiency, theoretical research, number of atoms, temperature, pressure, working substance

For citation: Futin V. A. Increasing the efficiency of power plants with heat recovery of automotive equipment by using a working substance with optimal physical properties. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(2):24–30. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-24-30>. EDN: XJVDCA. (In Russ.).



© Futin V. A., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Повышение коэффициента полезного действия (КПД) автомобильного двигателя за счет рекуперации тепла — одно из самых перспективных направлений современного автомобилестроения. Около 30–40 % энергии топлива в обычном двигателе внутреннего сгорания (ДВС) сбрасывается в атмосферу в виде тепла с выхлопными газами. Однако существуют проверенные технологии, позволяющие не только вернуть часть этой энергии, но и снизить расход топлива на 3–10 % [1].

Наиболее перспективным для массовых легковых автомобилей сегодня считается органический цикл Ренкина (ORC), так как он обеспечивает максимальный прирост КПД, а также термоэлектрические генераторы (ТЕГ), которые конструктивно проще встраиваются в систему и являются более надежными. В тяжелом грузовом транспорте, где режим работы более стабилен, технологии рекуперации уже начинают окупаться за счет экономии сотен литров топлива в год.

Известно [2–8], что двигатель с внешним подводом тепла (например, двигатель, осуществляющий цикл Ренкина), является важнейшим элементом системы рекуперации тепловых потерь, эффективность которой определяет КПД этого двигателя. Поэтому одной из основных задач, решаемых при создании эффективной системы рекуперации тепловых потерь, является обеспечение максимально возможного КПД такого двигателя, а именно двигателя Ренкина.

Также известно [7–15], что КПД цикла Ренкина зависит как от температурного диапазона, в котором работает цикл, так и от физических свойств рабочего вещества, реализующего этот цикл, а также от таких параметров работы цикла, как давление кипения, степень сухости пара в конце процесса расширения и ряда других.

Целью исследования является определение параметров рабочего вещества, реализующего цикл Ренкина, оптимальных с точки зрения эффективности этого цикла. Иначе говоря, цель состоит в оптимальном моделировании рабочего вещества.

Физическая модель рабочего вещества цикла Ренкина

Анализ литературы показал, что все рабочие вещества, которые можно использовать в цикле Ренкина, можно разделить на три группы по наклону правой ветви T-S-диаграммы: веществам с 3-х атомными молекулами, с 5–6-тью атомными молекулами, больше 6-ти атомов [3].

Следует ожидать, что в пределах каждой из трёх указанных групп веществ будет существовать оптимальное рабочее тело с точки зрения эффективности рекуперативного цикла Ренкина, поэтому моделирование будет проводиться для каждой из трёх групп веществ.

В основу моделирования положены следующие допущения относительно свойств рабочего вещества и режима работы цикла Ренкина:

1. Цикл Ренкина является идеальным обратимым циклом.
2. Рабочее тело, совершающее цикл Ренкина, является однокомпонентным веществом и в различных процессах может находиться в состоянии переохлаждённой жидкости, влажного пара и перегретого пара.
3. Работой насоса на повышение давления в цикле в силу её малости пренебрегаем [2–4].
4. Рабочее вещество, реализующее цикл Ренкина, при его нахождении в области перегретого пара рассматривается как идеальный газ.
5. Кривая насыщения рабочего вещества, осуществляющего цикл Ренкина, состоит из двух ветвей, которые являются квадратичными параболами.
6. Зависимость давления насыщения от температуры насыщения для рабочего вещества, осуществляющего цикл Ренкина, является логарифмической.
7. Теплофизические свойства веществ, в том числе их теплоёмкости, являются постоянными величинами и меняются только при изменении агрегатного состояния вещества.
8. Тепловыми потерями в окружающую среду во всех процессах, кроме процесса выхлопа, пренебрегаем.

На основе рассмотренной физической модели построим математическую модель, которая будет состоять из системы уравнений, описывающих процессы, из которых состоят циклы, а также соотношений для определения КПД и работы циклов по отдельности, и КПД и работы всей установки в целом.

Математическая модель рабочего вещества цикла Ренкина

В большей части процессы цикла Ренкина протекают в области влажного пара, поэтому для их расчёта необходимо знать вид функциональной зависимости $T = f(s)$, определяющей вид линий насыщения жидкости и пара. Уравнение линии насыщенной жидкости будем искать в виде уравнения параболы:

$$T = a \cdot s^2 + b \cdot s + c, \quad (1)$$

где a , b и c — множители, определяемые из условий:

$$\begin{cases} \left(\frac{dT}{ds}\right)_{\text{кр}} = 0 \\ T_0 = a \cdot s_0^2 + b \cdot s_0 + c \\ T_{\text{кр}} = a \cdot s_{\text{кр}}^2 + b \cdot s_{\text{кр}} + c. \end{cases} \quad (2)$$

В этой системе $s_{\text{кр}}$, $T_{\text{кр}}$ — удельная энтропия и абсолютная температура критической точки; s_0 , T_0 — удельная энтропия насыщенной жидкости и абсолютная температура при 0°C :

$$T = T_{\text{кр}} - (T_{\text{кр}} - T_0) \cdot \frac{(s_{\text{кр}} - s)^2}{(s_{\text{кр}} - s_0)^2}. \quad (3)$$

Аналогичным образом задаётся функция для правой ветви линии насыщения (линии сухого насыщенного пара):

$$T = T_{\text{кр}} - (T_{\text{кр}} - T_0) \cdot \frac{(s - s_{\text{кр}})^2}{(s_1 - s_{\text{кр}})^2}. \quad (4)$$

В этом выражении s_1 — удельная энтропия сухого насыщенного пара при 0°C .

Уравнение (4) можно использовать для построения в T-S-диаграммах линий сухого насыщенного пара веществ с 5–6-тью атомными молекулами и веществ, у которых молекула содержит больше 6-ти атомов. В первом случае значение s_1 примерно равно значению $s_{\text{кр}}$, во втором случае — $s_1 < s_{\text{кр}}$.

Из этих выражений можно выразить удельную энтропию насыщенную жидкости как функцию температуры:

$$s'(T) = s_{\text{кр}} - (s_{\text{кр}} - s_0) \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{кр}} - T}{T_{\text{кр}} - T_0}}, \quad (5)$$

а также зависимость удельной энтропии насыщенного пара от температуры:

$$s''(T) = s_{\text{кр}} + (s_1 - s_{\text{кр}}) \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{кр}} - T}{T_{\text{кр}} - T_0}}. \quad (6)$$

Величина удельной теплоты парообразования при температуре T определяется выражением

$$\begin{aligned} r &= r(T) = T \cdot [s''(T) - s'(T)] = \\ &= r_0 \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{кр}} - T}{T_{\text{кр}} - T_0}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для того чтобы получить зависимость удельной теплоты парообразования r от давления, то есть получить функцию $r = f(p)$, аппроксимируем обобщённую зависимость температуры насыщенного пара от давления, логарифмической функцией вида

$$T = a + b \cdot \ln(p). \quad (8)$$

где a и b — коэффициенты, которые определяются из условий:

$$T_0 = f(p_0).$$

Тогда функциональная зависимость $T = \varphi(p)$ примет вид

$$T(p) = T_0 + (T_{\text{кр}} - T_0) \cdot \frac{\ln \frac{p}{p_0}}{\ln \frac{p_{\text{кр}}}{p_0}}. \quad (9)$$

Подставляя последнее выражение в (7), получаем

$$r(p) = r_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{T_{\text{кр}}}{T_0} - 1 \right) \cdot \frac{\ln \frac{p}{p_0}}{\ln \frac{p_{\text{кр}}}{p_0}} \right] \cdot \sqrt{1 - \frac{\ln \frac{p}{p_0}}{\ln \frac{p_{\text{кр}}}{p_0}}}. \quad (10)$$

Подставляя выражение (10) в (6), получим зависимость удельной энтропии сухого насыщенного пара от давления

$$s''(T) = s_{\text{кр}} + (s_1 - s_{\text{кр}}) \cdot \sqrt{1 - \frac{\ln \frac{p}{p_0}}{\ln \frac{p_{\text{кр}}}{p_0}}}. \quad (11)$$

Энтальпию перегретого пара на основе принятых допущений рассматриваем как энтальпию идеального газа, то есть зависящую только от температуры

$$h(T) = c_p \cdot T + \text{const}. \quad (12)$$

Постоянную величину подбираем из условий, что при $T = T_0$ удельная энтальпия насыщенной жидкости равна нулю $h'(T_0)$, а удельная энтальпия сухого насыщенного пара при этой же температуре $h''(T_0)$ равна удельной теплоте парообразования r_0 , а именно

$$h'(T_0) = 0; \quad h''(T_0) = r_0.$$

С учётом этого, зависимость удельной энтальпии перегретого и сухого насыщенного пара от температуры можно представить в виде

$$h(T) = h''(T) \Big|_{\text{при } T \leq T_{\text{кр}}} = c_p \cdot (T - T_0) + r_0. \quad (13)$$

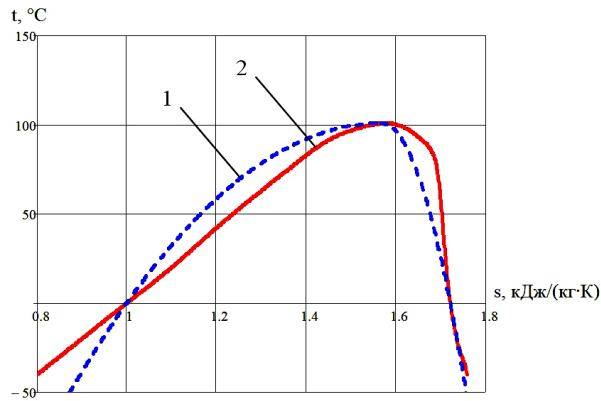


Рис. 1. Сравнение реальной (2) и смоделированной (1) линий насыщения фреона R134a
Fig. 1. Comparison of the real (2) and simulated (1) saturation lines of the R134a freon
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

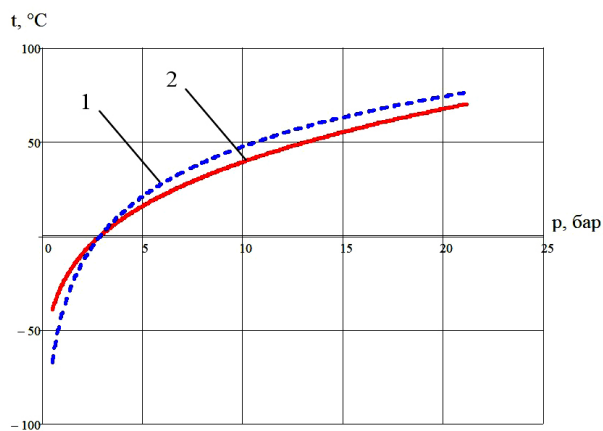


Рис. 2. Сравнение реальной (2) и смоделированной (1) зависимостей температуры насыщения от давления для фреона R134a
Fig. 2. Comparison of the real (2) and simulated (1) dependences of saturation temperature on pressure for the R134a freon
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

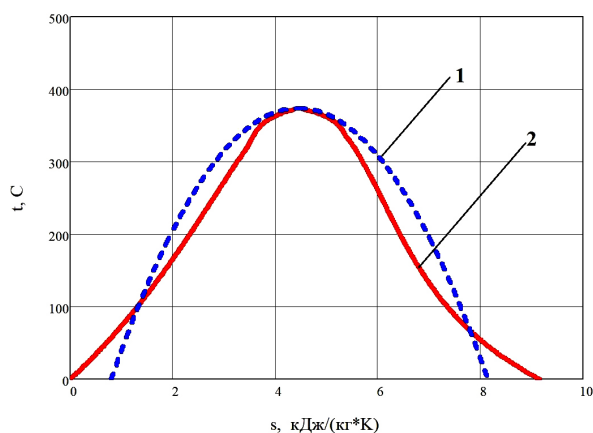


Рис. 3. Сравнение реальной (2) и смоделированной (1) линий насыщения воды
Fig. 3. Comparison of the real (2) and simulated (1) saturation lines of H₂O
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Верификация модели вещества

Верификацию построенной модели проведём посредством сравнения геометрии линии насыщения фреона R134a с геометрией линии насыщения этого же фреона, построенной на основе предложенной модели. Также сравним геометрию линии насыщения воды с геометрией линии насыщения, построенной на основе данной модели. Кроме того, сравним зависимость температуры насыщения от давления для R134a с зависимостью, построенной на основе модели. Сравнение реальных и смоделированных характеристик фреона представлено на рис. 1–3.

Как видно из рисунков, смоделированные зависимости удовлетворительно накладываются на реальные, поэтому предложенная модель поведения вещества может быть использована для качественного анализа эффективности цикла Ренкина.

Результаты теоретического исследования цикла Ренкина для трёх типов вещества

Выражения (3)–(13) использовались при расчёте КПД цикла Ренкина на основе известных методов [11, 12]. При проведении расчётов появились безразмерные комплексы. Для них были введены обозначения, при этом относительной величиной называлось отношение двух одинаковых величин, соответствующих разным условиям. Безразмерное отношение какой-либо величины к другой величине или комплексу величин другого физического происхождения, но той же размерности, будем называть приведённой величиной.

Введём обозначения для относительных и приведённых комплексов:

$\tau_e = \frac{T_e}{T_{кр}}$ — относительная максимальная температура в цикле;

$\tau_0 = \frac{T_0}{T_{кр}}$ — относительная нормальная температура;

$\pi = \frac{p}{p_{кр}}$ — относительное давление кипения;

$\pi_0 = \frac{p}{p_0}$ — относительное давление, соответствующее нормальной температуре;

$\sigma_{кр} = \frac{s_{кр}}{c_p}$ — приведённая критическая энтропия;

$p_0 = \frac{r_0}{c_p \cdot T_0}$ — приведённая нормальная теплота

парообразования.

Определим диапазоны изменений относительных и приведённых величин.

Критическая температура $T_{кр}$ нижней границей изменения значений имеет температуру окружающей среды T_0 , поэтому диапазон изменения значений относительной температуры окружающей среды — $\tau_0 \in (0;1)$.

Максимальная температура в цикле Ренкина T_e имеет в качестве естественного нижнего предела температуру окружающей среды T_0 , поэтому диапазон изменения относительной максимальной температуры в цикле — $\tau_0 \leq \tau_e$.

При этом температура T_e не может быть ниже температуры кипения $T_{кип}$, которая определяется по формуле:

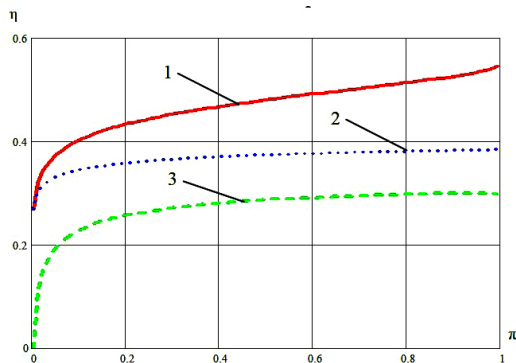


Рис. 4. Графики зависимости КПД от относительного давления кипения π :

- 1 — число атомов от 1 до 3 ($dT/dS < 0$);
2 — число атомов от 4 до 6 ($dT/dS = 0$);
3 — число атомов более 6 ($dT/dS < 0$)

Fig. 4. Graphs of the efficiency dependence on the relative boiling pressure of π :

- 1 — number of atoms is between 1 and 3 ($dT/dS < 0$);
2 — number of atoms is between 4 and 6 ($dT/dS = 0$);
3 — number of atoms is more than 6 ($dT/dS < 0$)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

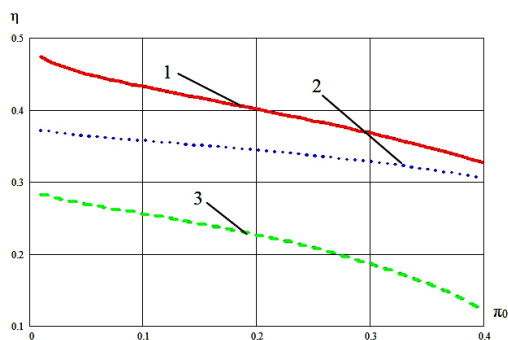


Рис. 5. Графики зависимости КПД от относительного давления π_0 , соответствующего нормальной температуре:

- 1 — число атомов от 1 до 3 ($dT/dS < 0$);
2 — число атомов от 4 до 6 ($dT/dS = 0$);
3 — число атомов более 6 ($dT/dS < 0$)

Fig. 5. Graphs of the efficiency coefficient as a function of the relative pressure of π_0 at normal temperature:

- 1 — number of atoms is between 1 and 3 ($dT/dS < 0$);
2 — number of atoms is between 4 and 6 ($dT/dS = 0$);
3 — number of atoms is more than 6 ($dT/dS < 0$)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

$$T_{\text{кип}} = T(p) = T_0 + (T_{\text{кр}} - T_0) \cdot \frac{\ln \frac{p}{p_0}}{\ln \frac{p_{\text{кр}}}{p_0}}.$$

Введём в рассмотрение относительную температуру кипения $\tau_e = \frac{T_{\text{кип}}}{T_{\text{кр}}}$, которая будет определяться выражением:

$$\tau_{\text{кип}} = \frac{T_{\text{кип}}}{T_{\text{кр}}} = \frac{T_0}{T_{\text{кр}}} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{кр}}}\right) \cdot \frac{\ln \frac{p/p_{\text{кр}}}{p_0/p_{\text{кр}}}}{\ln \frac{p_0/p_{\text{кр}}}{p_0/p_{\text{кр}}}}.$$

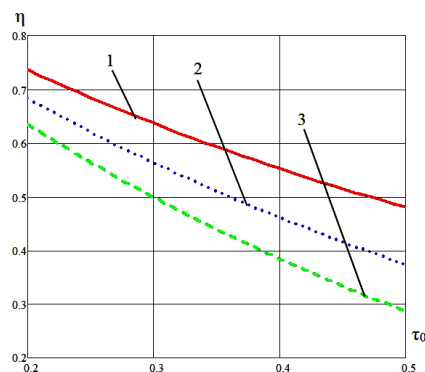


Рис. 6. Графики зависимости КПД от относительной нормальной температуры:

- 1 — число атомов от 1 до 3 ($dT/dS < 0$);
2 — число атомов от 4 до 6 ($dT/dS = 0$);
3 — число атомов более 6 ($dT/dS < 0$)

Fig. 6. Efficiency graphs depending on the relative normal temperature:

- 1 — number of atoms is between 1 and 3 ($dT/dS < 0$);
2 — number of atoms is between 4 and 6 ($dT/dS = 0$);
3 — number of atoms is more than 6 ($dT/dS < 0$)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

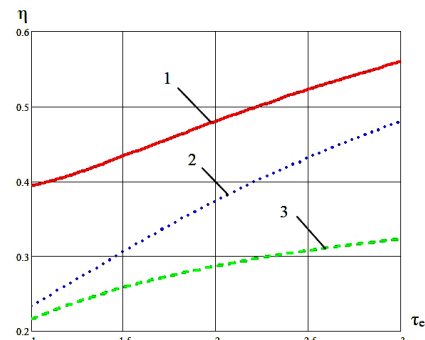


Рис. 7. Графики зависимости КПД от относительной максимальной температуры:

- 1 — число атомов от 1 до 3 ($dT/dS < 0$);
2 — число атомов от 4 до 6 ($dT/dS = 0$);
3 — число атомов более 6 ($dT/dS < 0$)

Fig. 7. Efficiency graphs as a function of the relative maximum temperature:

- 1 — number of atoms is between 1 and 3 ($dT/dS < 0$);
2 — number of atoms is between 4 and 6 ($dT/dS = 0$);
3 — number of atoms is more than 6 ($dT/dS < 0$)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Отсюда получаем

$$\tau_{\text{кип}} = \tau_0 + (1 - \tau_0) \cdot \frac{\ln \frac{\pi}{\pi_0}}{\ln \frac{1}{\pi_0}}. \quad (14)$$

Таким образом, должно выполняться соотношение $\tau_{\text{кип}} \leq \tau_e$.

Критическая энтропия $s_{\text{кр}}$ может быть как больше, так и меньше удельной массовой изобарной теплоёмкости пара, поэтому для приведённой критической энтропии выполняется соотношение $0 < \sigma_{\text{кр}}$.

Приведённая теплота парообразования при температуре окружающей среды ρ_0 также удовлетворяет условию $0 < \rho_0$. При этом соотношения между ρ_0 и $\sigma_{\text{кр}}$ определяются исходя из конфигурации T-S-диаграммы.

Проведённый анализ на основе предложенной методики позволил получить зависимости, представленные на рис. 4–7.

На рис. 4–7 представлены следующие линии функций: 1 — число атомов от 1 до 3 ($dT/dS < 0$); 2 — число атомов от 4 до 6 ($dT/dS = 0$); 3 — число атомов более 6 ($dT/dS < 0$).

На основе представленных зависимостей (рис. 3–6) можно сделать следующие выводы: необходимо выбирать вещества с числом атомов 1–3; критическая температура рабочего тела должна иметь как можно большее значение; вещество должно иметь как можно большее критическое давление; паровая фаза рабочего тела должна иметь большую удельную массовую изобарную теплоёмкость; желательно обеспечивать режим работы цикла с давлением кипения, близким к критическому значению.

Заключение

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Проведён анализ современной научно-технической литературы, на основе которого был сделан вывод о том, что повышение эффективности рекуперативного цикла Ренкина является актуальной научно-технической задачей.

2. На основе анализа современной литературы было показано, что эффективность цикла Ренкина зависит от свойств рабочих веществ, реализующих цикл. При этом все рабочие вещества разделены на три группы: 1–3-х атомные, 4–6-ти атомные и с числом атомов больше 6-ти. Каждой группе соответствует свой тип T-S-диаграммы.

3. Для анализа влияния свойств рабочего вещества на эффективность и моделирование его оптимальных свойств была разработана физическая и математическая модели физических свойств для каждой группы веществ.

4. На основе моделей физических свойств были получены выражения для КПД цикла Ренкина указанных групп веществ, а также были введены в рассмотрение безразмерные относительные и приведённые величины.

5. Был проведён численно-графический анализ зависимости КПД цикла Ренкина от основных безразмерных величин.

6. Были выработаны рекомендации для выбора или синтеза оптимального рабочего вещества, реализующего цикл Ренкина. Эти рекомендации состоят в том, что:

а) вещества, обеспечивающие наибольшую энергоэффективность, содержат 1–3 атома в молекуле;

б) критическая температура теплоносителя должна иметь большое значение;

в) критическое давление должно быть максимально большим;

г) рабочее вещество в состоянии пара должно обладать высоким значением удельной массовой изобарной теплоёмкости;

д) давление кипения должно быть максимально близким к критическому;

е) наибольшая температура цикла должна быть максимально высокой.

Список источников / References

1. Durand T., Eggenschwiler P. D., Tang Y. Potential of energy recuperation in the exhaust gas of state of the art light

duty vehicles with thermoelectric elements. *Fuel*. 2018;224:271–279. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.078>.

2. Евдокимов В. С., Чернов Г. И., Калашников А. М., Райковский Н. А. Рекуперация тепловых потерь водородного двигателя внутреннего сгорания на основе разомкнутого цикла Ренкина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2026. № 1. С. 226–237. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2026-1-226-227>. EDN: YEBUYR.

Evdokimov V. S., Chernov G. I., Kalashnikov A. M., Raikovskiy N. A. Recovery of heat losses of a hydrogen internal combustion engine based on an open Rankine cycle. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki*. 2026;1:226–237. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2026-1-226-227>. EDN: YEBUYR. (In Russ.).

3. Калашников А. М., Чернов Г. И., Евдокимов В. С. Математическая модель системы рекуперации тепловых потерь передвижной компрессорной станции на основе холодильной машины // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 35–48. <https://doi.org/10.18721/JEST.30202>. EDN: NVBGOM.

Kalashnikov A. M., Chernov G. I., Evdokimov V. S. Mathematical model of the waste heat recovery system of a mobile compressor station based on a refrigeration unit. *Global Energy*. 2024;2(30):35–48. <https://doi.org/10.18721/JEST.30202>. EDN: NVBGOM. (In Russ.).

4. Чернов Г. И., Васильев В. К., Садвакасов Д. Х. [и др.]. Анализ влияния эффективности рекуперативного теплообмена на тепловые потери мобильной компрессорной установки // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 2. С. 33–35. EDN: YLEITN.

Chernov G. I., Vasiliev V. K., Sadvakasov D. H. [et al.]. Analysis of the impact of efficiency of regenerative heat exchange in the heat loss of mobile compressor unit. *Compressors & Pneumatics*. 2017;2:33–35. EDN: YLEITN. (In Russ.).

5. Леонов В. П., Воронов В. А., Апсит К. А. [и др.]. Цикл Ренкина с низкопотенциальным источником теплоты // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 2 (38). С. 12. EDN: TPIFVV.

Leonov V. P., Voronov V. A., Apsit K. A. [et al.]. Rankine cycle with low-potential heat source. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2015;2(38):12. EDN: TPIFVV. (In Russ.).

6. Burnete N. V., Mariasiu F., Depcik C. [et al.]. Review of thermoelectric generation for internal combustion engine waste heat recovery. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022;91:101009. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101009>.

7. Yusha V. L., Chernov G. I., Sadvakasov D. H. The efficiency analysis for the heat losses recuperation system of the mobile refrigeration unit. *Procedia Engineering*. 2016;152:339–347. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.713>.

8. Белов Г. В., Дорохова М. А. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 2. С. 99–124. <https://doi.org/10.7463/0214.0699165>. EDN: SGSLVP.

Belov G. V., Dorokhova M. A. Organic Rankine Cycle and its application in renewable power engineering. *Nauka i Obrazovaniye: Nauchnoye Izdaniye MG TU im. N. E. Bauman*. 2014;2:99–124. <https://doi.org/10.7463/0214.0699165>. EDN: SGSLVP. (In Russ.).

9. Леонов В. П., Воронов В. А., Апсит К. А., Ципун А. Цикл Ренкина с низкопотенциальным источником теплоты // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 2 (38). С. 12. EDN: TPIFVV.

Leonov V., Voronov V., Apsit K., Tsipun A. Rankine cycle with low-potential heat source. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2015;2(38):12. EDN: TPIFVV. (In Russ.).

10. Минцаев М. Ш., Ахмиева Г. Р. Возможности использования органического цикла Ренкина в различных отраслях экономики: мировой опыт и экономическая целесообразность // Экономика и предпринимательство. 2023. № 7 (156).

C. 1456 – 1459. <https://doi.org/10.34925/EIP.2023.156.7.263>. EDN: SMGFKQ.

Mintsaeв M. Sh., Akhmetieva G. R. Possibilities of using the Organic Rankine Cycle in various sectors of the economy: global experience and economic feasibility. *Ekonomika i Predprinimatel'stvo*. 2023;7(156):1456 – 1459. <https://doi.org/10.34925/EIP.2023.156.7.263>. EDN: SMGFKQ. (In Russ.).

11. Калашников А. М., Чернов Г. И., Парамонов А. М. [и др.]. Верификация методики расчета теплообменников систем рекуперации тепловых потерь энерготехнологических установок // Компрессорная техника и пневматика. 2021. № 3. С. 22 – 28. EDN: XZHWZK.

Kalashnikov A. M., Chernov G. I., Paramonov A. M. [et al.]. Verification of the methodology for calculating heat exchangers or heat loss recovery systems of power engineering installations. *Compressors & Pneumatics*. 2021;3:22 – 28. EDN: XZHWZK. (In Russ.).

12. Чернов Г. И., Калашников А. М., Юша В. Л. [и др.]. Параметрический анализ теплообменного аппарата системы рекуперации тепловых потерь мобильной компрессорной установки // Компрессорная техника и пневматика. 2019. № 2. С. 17 – 21. EDN: XYDCTA.

Chernov G. L., Kalashnikov A. M., Yusha V. L. [et al.]. Parametric analysis of the heat exchanger of the heat loss recovery system of a mobile compressor unit. *Compressors & Pneumatics*. 2019;2:17 – 21. EDN: XYDCTA. (In Russ.).

13. Bahrami M., Pourfayaz F., Ahmadi M. H. Waste heat recovery of a micro gas turbine: A comprehensive comparison between organic Rankine, supercritical Brayton and Kalina cycles. *Applied Thermal Engineering*. 2026;1(288):129556. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129556>.

14. Zhao J., Zhang H., Ying L. Cryogenic energy-assisted organic Rankine cycles with low-flammability refrigerants: System charge effects and environmental performance. *Fuel Processing Technology*. 2026;289:108461. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2026.108461>.

15. Chen Y., Bao A., Wu D. [et al.]. Experimental study of discharge performance of pumped thermal energy storage system based on organic Rankine cycle. *Energy*. 2025;340:139398. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139398>.

Информация об авторе:

ФУТИН Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение»

Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева — КАИ, г. Казань.

SPIN-код: 3739-2123

AuthorID (РИНЛ): 713366

AuthorID (SCOPUS): 23027608200

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-227x>

e-mail: vafutin@kai.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

Information about the author:

FUTIN Viktor Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Heat Engineering and Power Engineering Department, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan.

SPIN-code: 3739-2123

AuthorID (RSCI): 713366

AuthorID (SCOPUS): 23027608200

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-227x>

e-mail: vafutin@kai.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 20.04.2026; approved after reviewing 03.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.