

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра ЮНЕСКО  
«Энергосбережение и возобновляемые источники энергии»

Н. Г. Хутская  
Г. И. Пальченок

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности  
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии  
и энергетический менеджмент»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск  
БНТУ  
2021

УДК 621.1.016.7 (075.8)

ББК 22.317я7

X98

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники БГТУ,  
зав. кафедрой *А. С. Дмитриченко*;  
д-р техн. наук, профессор *В. А. Бородуля*

**Хутская, Н. Г.**

X98 Термодинамический расчет циклов тепловых двигателей: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / Н. Г. Хутская, Г. И. Пальченок. – Минск: БНТУ, 2021. – 49 с.  
ISBN 978-985-583-575-3.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с учебным планом кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» по дисциплине «Термодинамика» для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент».

**УДК 621.1.016.7 (075.8)**  
**ББК 22.317я7**

**ISBN 978-985-583-575-3**

© Хутская Н. Г., Пальченок Г. И., 2021  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2021

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 4  |
| 1. Цикл Отто – сгорание при постоянном объеме.<br>Цикл карбюраторного двигателя ..... | 6  |
| 2. Цикл Дизеля – сгорание при постоянном давлении.....                                | 12 |
| 3. Цикл Тринклера .....   | 17 |
| 4. Цикл Карно.....  | 23 |
| 5. Цикл Стирлинга.....  | 29 |
| 6. Сравнение эффективности идеальных циклов .....                                     | 33 |
| 7. Задачи .....   | 34 |
| 8. Вопросы.....   | 47 |
| Список литературы.....  | 49 |

## ВВЕДЕНИЕ

Все тепловые двигатели поршневого типа делятся на две основные группы: двигатели внешнего сгорания и двигатели внутреннего сгорания. В двигателях внешнего сгорания (к ним относятся паровые двигатели) рабочее тело получает тепло вне двигателя, и уже нагретым поступает в цилиндр для преобразования теплоты в полезную работу. В двигателях внутреннего сгорания процесс подвода теплоты к рабочему телу осуществляется непосредственно в цилиндре двигателя. При этом осуществляются физико-химические преобразования рабочего тела.

Рабочее тело в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в начале – воздух или смесь воздуха с топливом, а в конце – смесь газов, образовавшаяся в процессе сгорания топлива. Теплота к рабочему телу подводится от сжигаемого топлива внутри цилиндров двигателя, в которых газ, расширяющийся от нагревания, перемещает поршень. Получаемая газом энергия частично расходуется на совершение механической работы, остальная часть передается окружающей среде, либо расходуется на преодоление сил трения.

По способам приготовления горючей смеси все ДВС подразделяются на две группы: с внешним и внутренним смесеобразованием.

К двигателям с внешним смесеобразованием относятся карбюраторные и газовые двигатели, где рабочая смесь готовится в специальном устройстве – карбюраторе (при работе на жидком топливе) или смесителе (при работе на газовом топливе). При этом в камеру сгорания подается уже готовая рабочая смесь, которая принудительно воспламеняется от электрической искры (свечи зажигания).

Последовательность термодинамических процессов в любом современном поршневом двигателе внутреннего сгорания в той или иной степени приближена к одному из трех характерных циклов, называемых идеальными циклами Отто, Дизеля и Тринклера–Сабатэ. При этом принципиальное различие этих циклов проявляется лишь в характере процесса сгорания топлива (*подвода теплоты*), который в идеальном цикле Отто протекает в условиях постоянного объема камеры сгорания, в цикле Дизеля – при постоянном давлении в цилиндре, а в цикле Тринклера–Сабатэ – последовательно по изохорному, а затем по изобарному процессам. Исходя из приведенных характеристик, циклы Отто, Дизеля и Тринклера–Сабатэ

иногда называют, соответственно, циклами быстрого, постоянного и смешанного сгорания, которые положены в основу работы карбюраторного, компрессорного и бескомпрессорного двигателей. Приведенные ниже идеальные циклы тепловых двигателей внутреннего сгорания описывают последовательность термодинамических процессов, протекающих по двухтактному сценарию, т. е. поршень в цилиндре совершает за один цикл два хода – вверх и вниз. Реальные тепловые двигатели могут работать и по двухтактному, и по более эффективному четырехтактному циклу.

# 1. ЦИКЛ ОТТО – СГОРАНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ. ЦИКЛ КАРБЮРАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ



**Николаус Отто** (10.06.1832–26.01.1891). Родился в г. Хольцхаузене в бедной семье. Начинал учиться в реальном училище, но бросил его и работал продавцом в лавке. Все свободное время проводил за конструированием газовых двигателей и стремился совершенствовать их. В 1862 г. он начал свои эксперименты с четырехтактным двигателем и только в 1876 г. довел его до рабочего состояния (рис. 1.1).

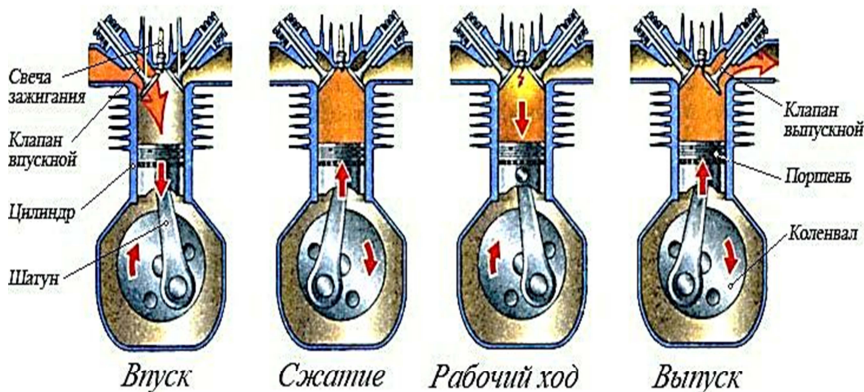


Рис. 1.1. Четырехтактный карбюраторный двигатель

На рис. 1.2 приведена индикаторная диаграмма карбюраторного двигателя – зависимость давления в цилиндре от переменного объема газа в цилиндре или, что то же самое, от хода поршня.

Термодинамический анализ цикла Отто удобно проводить, рассматривая идеализированный цикл, соответствующий рассмотренной индикаторной диаграмме. Цикл представлен в  $p, v$ -диаграмме для единицы массы рабочего тела (рис. 1.3).

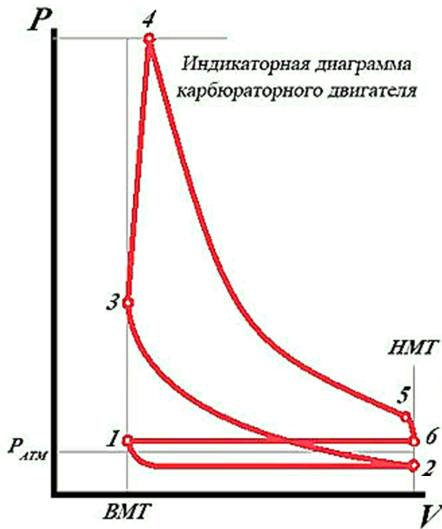


Рис. 1.2. Индикаторная диаграмма цикла Отто:

ВМТ – верхняя мертвая точка; НМТ – нижняя мертвая точка;

- 1–2 – заполнение цилиндра рабочей смесью; 2–3 – сжатие рабочей смеси;
  - 3–4 – горение рабочей смеси; 4–5 – рабочий ход (расширение продуктов сгорания);
  - 5–6 – выхлоп отработавших газов, падение давления до атмосферного при постоянном объеме; 6–1 – освобождение цилиндра от продуктов сгорания.
- Процессы 1–2 и 6–1 исключают из рассмотрения, так как работа в них одинакова, только имеет разный знак

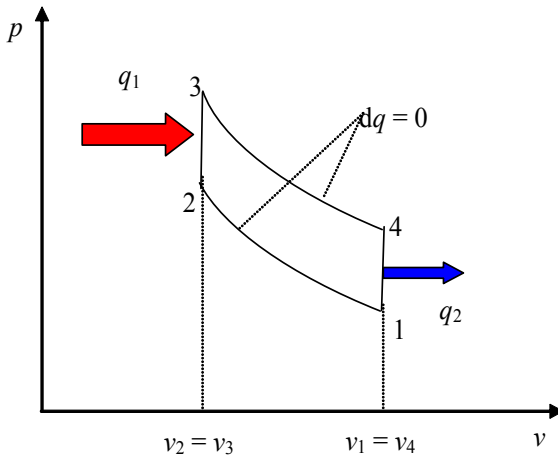


Рис. 1.3. Диаграмма цикла Отто ( $p, v$ )

Цикл задается двумя параметрами рабочего тела  $p_1, T_1$  и параметрами цикла, число которых равно числу точек цикла минус 2.

Задано:

$$p_1, T_1, \varepsilon = \frac{v_1}{v_2}, \lambda = \frac{p_3}{p_2},$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия,

$\lambda$  – степень увеличения давления.

1–2 – адиабатное сжатие воздушно-топливной смеси,

2–3 – подвод теплоты при постоянном объеме,

3–4 – адиабатное расширение продуктов сгорания,

4–1 – отвод теплоты в окружающую среду при постоянном объеме.

На рис. 1.4 приведен цикл Отто в  $T, s$ -диаграмме.

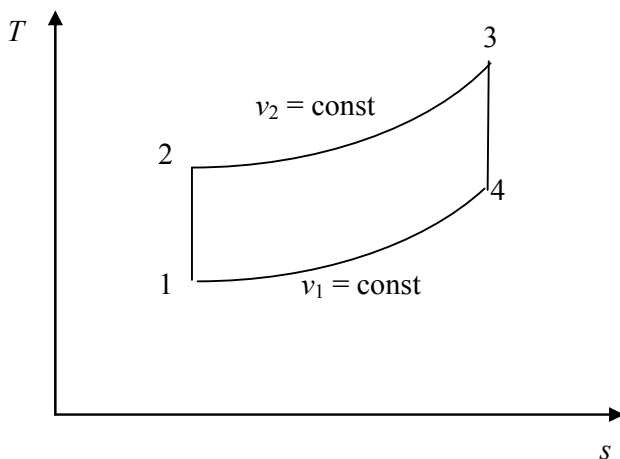


Рис. 1.4. Диаграмма цикла Отто ( $T, s$ )

Рассчитываем цикл:

Точка 1:

$$p_1, T_1, v_1 = \frac{RT_1}{p_1}.$$



Точка 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon},$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k \Rightarrow p_2 = p_1 \varepsilon^k,$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}.$$

Точка 3:

$$v_3 = v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon},$$

$$p_3 = \lambda p_2 = \lambda \varepsilon^k p_1,$$

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow T_3 = \lambda T_2 = \lambda \varepsilon^{k-1} T_1.$$

Точка 4:

$$v_4 = v_1;$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = \left(\frac{v_1}{\varepsilon \cdot v_1}\right)^k = \frac{1}{\varepsilon^k} \Rightarrow p_4 = \frac{p_3}{\varepsilon^k} = \frac{\lambda \varepsilon^k p_1}{\varepsilon^k} = \lambda p_1,$$

$$\lambda = \frac{p_4}{p_1} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow T_4 = \lambda T_1.$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2).$$

Количество отведенной теплоты

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1).$$

## Термический КПД цикла Отто

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1}} = \\ &= 1 - \frac{\lambda - 1}{\frac{\lambda - 1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\lambda - 1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}} = 1 - \frac{\lambda - 1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}, \\ \eta_t &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} \end{aligned}$$

КПД цикла Отто растет с увеличением степени сжатия.

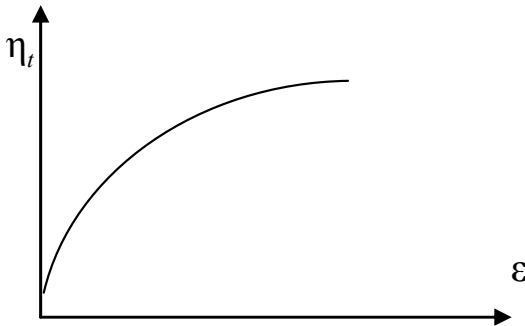


Рис. 1.5. Зависимость КПД цикла Отто от степени сжатия

С точки зрения увеличения термического КПД выгодно увеличивать степень сжатия. Однако практически осуществить сжатие до слишком высоких значений  $\varepsilon$ , сопровождающееся значительным увеличением температуры и давления, не удастся, так как при достижении определенного значения  $\varepsilon$  часто еще до прихода поршня в крайнее левое положение происходит самовоспламенение горючей смеси, этот процесс носит детонационный характер и разрушает элементы двигателя.

Величина степени сжатия зависит от качества топлива.

Карбюраторные двигатели, работающие по циклу Отто, широко распространены в технике – они применяются в легковых и многих грузовых автомобилях, на самолетах с поршневыми двигателями.

*Среднее индикаторное давление* – отношение работы цикла к удельному рабочему объему цилиндра двигателя (некое условное постоянное давление, действующее в течение хода расширения и создающее работу, равную работе соответствующей индикаторной диаграммы).

$$p_i = \frac{l}{v_1 - v_2} = \frac{c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{v_1 - \frac{v_1}{\varepsilon}} = \frac{c_v \left[ \left( \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right) - \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right) \right]}{\frac{1}{T_1} v_1 \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)}$$

Из уравнения состояния

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{R}{p_1},$$

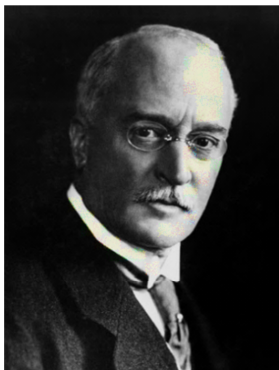
$$p_i = \frac{c_v \left[ \left( \lambda \varepsilon^{k-1} - \varepsilon^{k-1} \right) - (\lambda - 1) \right]}{\frac{R}{p_1} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \frac{c_v}{R} \left[ \left( \varepsilon^{k-1} - 1 \right) (\lambda - 1) \right],$$

$$\frac{c_v}{R} = \frac{c_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{\frac{c_p}{c_v} - 1} = \frac{1}{k - 1},$$

$$p_i = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{1}{k - 1} p_1 \left[ \left( \varepsilon^{k-1} - 1 \right) (\lambda - 1) \right].$$

Степень сжатия  $\varepsilon$  в цикле может быть повышена, если сжимать не горючую смесь, а чистый воздух, а затем, после окончания процесса сжатия, вводить в цилиндр горючее. Именно на этом основан цикл Дизеля.

## 2. ЦИКЛ ДИЗЕЛЯ – СГОРАНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ



Рудольф Дизель (Rudolf Diesel) (18.03.1858–29.09.1913) родился в Париже в немецкой семье переплетчика книг, эмигрировавшей во Францию.

В 1870 году из-за начавшейся Франко-прусской войны всю семью выслали в Англию, откуда родители отправили Рудольфа заканчивать образование в Германии – сначала в Аугсбурге, а затем в Королевской Баварской технической школе в Мюнхене, которую Рудольф закончил с отличием. В 1892 году получил патент под названием «Рабочий процесс и способ выполнения одноцилиндрового и многоцилиндрового двигателей».

В 1897 году был продемонстрирован двигатель мощностью 25 лошадиных сил.

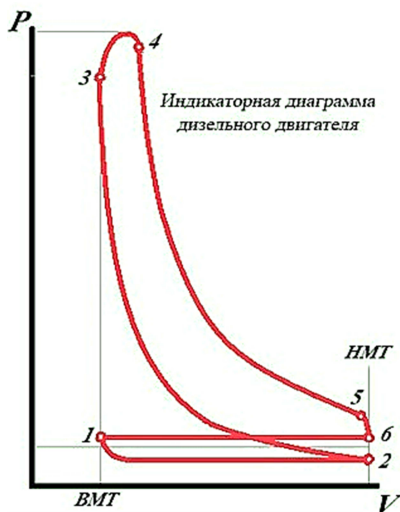


Рис. 2.1. Индикаторная диаграмма цикла Дизеля:

1–2 – заполнение цилиндра воздухом; 2–3 – сжатие воздуха; 3–4 – горение рабочей смеси; 4–5 – рабочий ход (расширение продуктов сгорания); 5–6 – выхлоп отработавших газов, падение давления до атмосферного при постоянном объеме; 6–1 – освобождение цилиндра от продуктов сгорания

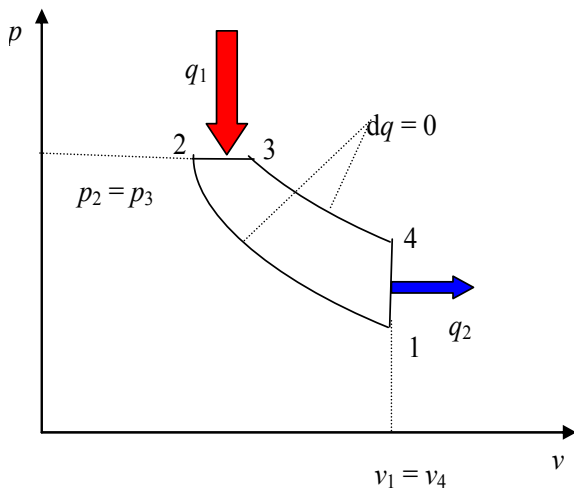


Рис. 2.2. Диаграмма цикла Дизеля ( $p, v$ )

Цикл задается двумя параметрами рабочего тела  $p_1, T_1$  и параметрами цикла, число которых равно числу точек цикла минус 2.

Задано:

$$p_1, T_1, \varepsilon = \frac{v_1}{v_2}; \rho = \frac{v_3}{v_2},$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия,

$\rho$  – степень предварительного расширения.

Всасывается чистый атмосферный воздух и сжимается до давления  $p_2$ . Степень сжатия в цикле Дизеля  $\varepsilon = 15-16$ . Затем начинается процесс расширения воздуха и одновременно через форсунку впрыскивается топливо. Из-за высокой температуры сжатого воздуха топливо воспламеняется и сгорает при постоянном давлении. После того, как процесс ввода топлива в цилиндр заканчивается (точка 3), дальнейшее расширение рабочего тела происходит по адиабате 3–4. В состоянии, соответствующем точке 4, открывается выхлопной клапан цилиндра, давление в цилиндре снижается до атмосферного, газ выталкивается в атмосферу.

1–2 – адиабатное сжатие воздуха,

2–3 – подвод теплоты при постоянном давлении,

3–4 – адиабатное расширение продуктов сгорания,  
 4–1 – отвод теплоты в окружающую среду при постоянном объеме.

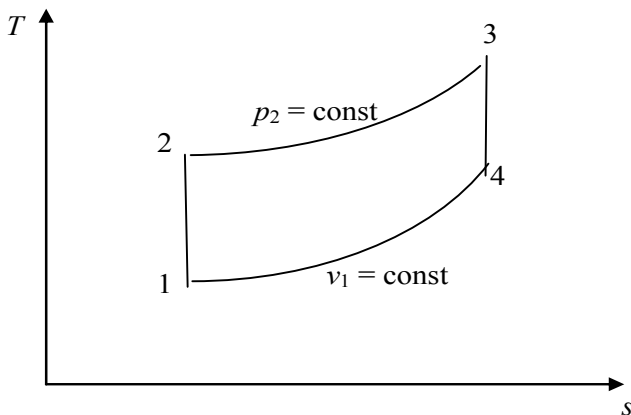


Рис. 2.3. Диаграмма цикла Дизеля ( $T, s$ )

Рассчитываем цикл:

Точка 1:

$$p_1, T_1, v_1 = \frac{RT_1}{p_1}.$$

Точка 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon},$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k \Rightarrow p_2 = p_1 \varepsilon^k,$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}.$$

Точка 3:

$$v_3 = \rho v_2 = \rho \frac{v_1}{\varepsilon},$$

$$p_3 = p_2 = \varepsilon^k p_1,$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow T_3 = \rho T_2 = \rho \varepsilon^{k-1} T_1.$$

Точка 4:

$$v_4 = v_1,$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = \left(\frac{\rho v_1}{\varepsilon \cdot v_1}\right)^k = \frac{\rho^k}{\varepsilon^k} \Rightarrow p_4 = p_3 \frac{\rho^k}{\varepsilon^k} = \frac{\rho^k \varepsilon^k p_1}{\varepsilon^k} = \rho^k p_1,$$

$$\rho^k = \frac{p_4}{p_1} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow T_4 = \rho^k T_1.$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2).$$

Количество отведенной теплоты

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1).$$

Термический КПД цикла Дизеля

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{k \left( \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right)} = \\ &= 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \left( \rho \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right)} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1)}, \\ \eta_t &= 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1)}. \end{aligned}$$

КПД цикла Дизеля растет с увеличением степени сжатия и уменьшается с ростом степени предварительного расширения.

Двигатель Дизеля может работать на более низкосортном топливе.

Известными недостатками двигателя Дизеля по сравнению с двигателем Отто являются необходимость затраты работы на привод устройства для распыления топлива и относительная тихоходность, обусловленная более медленным сгоранием топлива.

Среднее индикаторное давление

$$p_i = \frac{l_u}{v_1 - v_2} = \frac{q_1 - q_2}{v_1 - \frac{v_1}{\varepsilon}},$$

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2), \quad q_2 = c_v (T_4 - T_1),$$

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}, \quad T_3 = \rho \varepsilon^{k-1} T_1, \quad T_4 = \rho^k T_1,$$

$$p_i = \frac{c_p (T_3 - T_2) - c_v (T_4 - T_1)}{v_1 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)},$$

$$p_i = \frac{c_v \left[ k \left( \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right) - \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right) \right]}{\frac{v_1}{T_1} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}} =$$

$$= \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_1}{R} c_v \left[ k (\rho \varepsilon^{k-1} - \varepsilon^{k-1}) - (\rho^k - 1) \right] =$$

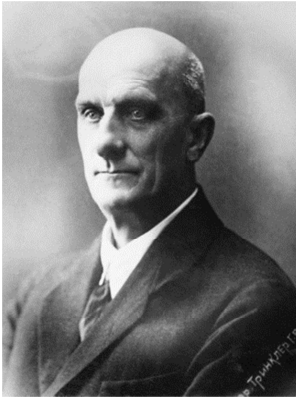
$$= \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \frac{c_v}{R} \left[ k \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) - (\rho^k - 1) \right],$$

$$\frac{c_v}{R} = \frac{c_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{k - 1},$$

$$p_i = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \frac{1}{k - 1} \left[ k \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) - (\rho^k - 1) \right].$$



### 3. ЦИКЛ ТРИНКЛЕРА



**Густав Васильевич Тринклер** (12.04.1876– 04.02.1957) – русский и советский ученый и изобретатель, создатель бескомпрессорного дизельного двигателя. Закончил Санкт-Петербургский технологический институт в 1899 г. Студентом начал разрабатывать проект нового теплового двигателя, работающего на жидком углеродном топливе с воспламенением от сжатия.

На рис. 3.1 показан двигатель Тринклера.

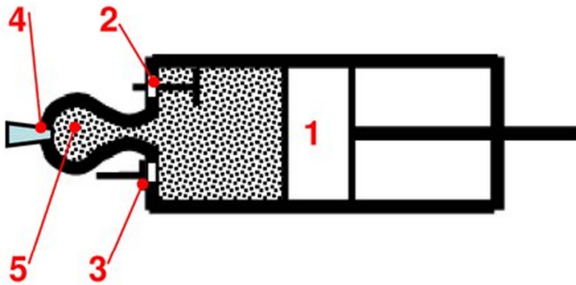


Рис. 3.1. Двигатель Тринклера:  
1 – поршень; 2 – впускной клапан; 3 – выпускной клапан;  
4 – форсунка; 5 – форкамера

Гибридом циклов Отто и Дизеля является цикл со смешанным сгоранием или цикл Тринклера. Двигатели, работающие по этому типу, имеют так называемую форкамеру, соединенную с рабочим цилиндром узким каналом. Техническое совершенствование дизельного двигателя, направленное на ускорение процесса горения топлива и исключение компрессора, привело к созданию бескомпрессорного дизеля, в котором топливо в цилиндр подается насосом через форсунки. Механическая подача топлива увеличивает скорость образования смеси и сокращает время сгорания.

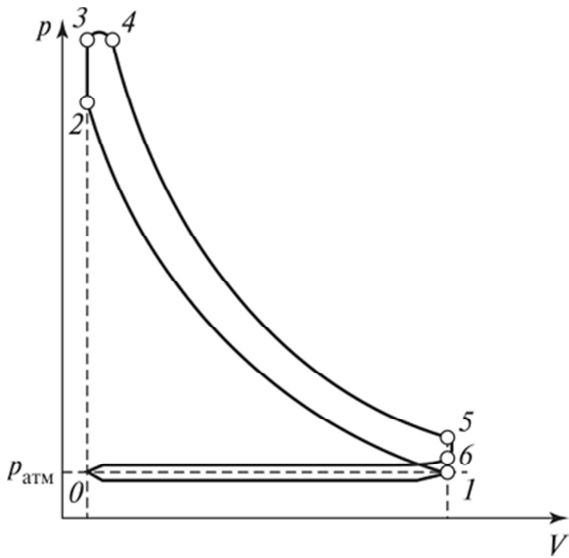


Рис. 3.2. Индикаторная диаграмма цикла Тринклера

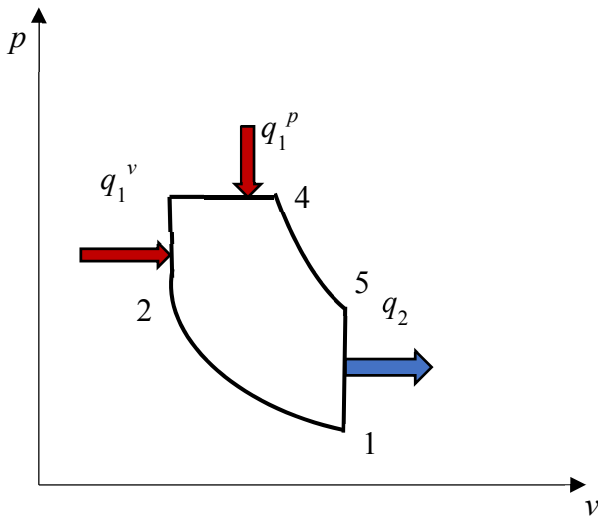


Рис. 3.3. Диаграмма цикла Тринклера ( $p, v$ ):  
 1–2 – адиабатное сжатие воздуха; 2–3 – подвод теплоты при  $v = \text{const}$ ;  
 3–4 – подвод теплоты при  $p = \text{const}$ ; 4–5 – адиабатное расширение  
 продуктов сгорания; 5–1 – отвод теплоты при  $v = \text{const}$

В рабочем цилиндре воздух адиабатно сжимается за счет инерции маховика, сидящего на валу двигателя, нагреваясь при этом до температуры, обеспечивающей воспламенение жидкого топлива, подаваемого в форкамеру (1–2). Форма и расположение форкамеры способствует наилучшему смешению топлива с воздухом, в результате чего происходит быстрое сгорание части топлива в небольшом объеме форкамеры (2–3).

Благодаря возрастанию давления в форкамере образовавшаяся в ней смесь несгоревшего топлива, воздуха и продуктов сгорания проталкивается в рабочий цилиндр, где происходит догорание оставшегося топлива, сопровождающееся перемещением поршня слева направо при приблизительно постоянном давлении (3–4). По окончании сгорания топлива дальнейшее расширение продуктов сгорания (рабочий ход) происходит адиабатно (4–5), после чего отработавшие газы удаляются из цилиндра (5–1). Таким образом, в цикле со смешанным сгоранием подвод теплоты ( $q_1$ ) осуществляется сначала по изохоре ( $q_1^V$ ), а затем по изобаре ( $q_1^P$ ). Особенность двигателя со смешанным сгоранием состоит в том, что, в отличие от двигателя Дизеля, он не нуждается в компрессоре высокого давления для распыления жидкого топлива. Жидкое топливо, введенное в форкамеру при сравнительно невысоком давлении, распыляется струей сжатого воздуха, поступающего из основного цилиндра.

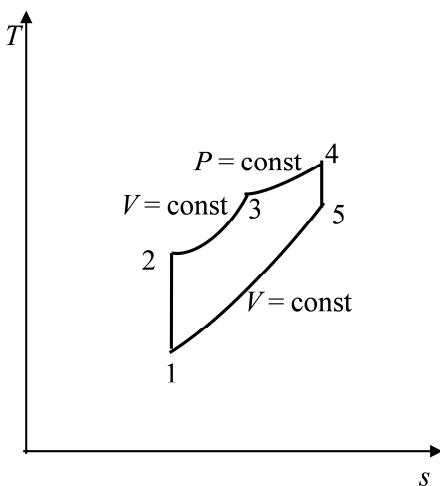


Рис. 3.4. Диаграмма цикла Тринклера ( $T, s$ )

Задано:

$$p_1, T_1, \varepsilon = \frac{v_1}{v_2}, \lambda = \frac{p_3}{p_2}, \rho = \frac{v_4}{v_3}.$$

Точка 1:

$$p_1, T_1, v_1 = \frac{RT_1}{p_1}.$$

Точка 2:

$$\underline{v_2} = \frac{v_1}{\varepsilon}, \underline{p_2} = p_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k,$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}, \underline{T_2} = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1}.$$

Точка 3:

$$\underline{p_3} = \lambda p_2 = \lambda \varepsilon^k p_1; \underline{v_3} = v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon},$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda \Rightarrow \underline{T_3} = \lambda T_2 = \lambda \varepsilon^{k-1} T_1.$$

Точка 4:

$$\underline{p_4} = p_3 = \lambda \varepsilon^k p_1,$$

$$\underline{v_4} = \rho v_3 = \frac{\rho}{\varepsilon} v_1, \frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3},$$

$$T_4 = T_3 \frac{v_4}{v_3} = T_3 \rho = \rho \lambda \varepsilon^{k-1} T_1.$$

Точка 5:

$$\underline{v_5} = v_1,$$

$$\frac{p_5}{p_4} = \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^k \Rightarrow \underline{p_5} = p_4 \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^k = \lambda \varepsilon^k p_1 \left( \frac{\rho v_1}{\varepsilon v_1} \right)^k = \lambda \rho^k p_1,$$

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{p_5}{p_1} \Rightarrow T_5 = T_1 \frac{p_5}{p_1} = T_1 \lambda \rho^k.$$

Подведенная теплота

$$q_1 = q_1^v + q_1^p = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3).$$

Отведенная теплота

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1).$$

Работа цикла

$$l = q_1 - q_2 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) - c_v(T_5 - T_1).$$

Термический КПД цикла Тринклера

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1^v + q_1^p} = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)}.$$

Разделим числитель и знаменатель на  $c_v T_1$

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{\left(\frac{T_5}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1}\right) + k \left(\frac{T_4}{T_1} - \frac{T_3}{T_1}\right)} = \\ &= 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\left(\lambda \varepsilon^{k-1} - \varepsilon^{k-1}\right) + k \left(\rho \lambda \varepsilon^{k-1} - \lambda \varepsilon^{k-1}\right)}; \\ \eta_t &= 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} \left[ (\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1) \right]}. \end{aligned}$$

КПД растёт с увеличением степени сжатия  $\varepsilon$ , уменьшается с ростом степени предварительного расширения  $\rho$ , а зависимость его от  $\lambda$  – степени увеличения давления зависит от соотношения между  $\varepsilon$  и  $\rho$ .

Среднее индикаторное давление

$$p_i = \frac{l_{\text{ц}}}{v_1 - v_2} = \frac{q_1 - q_2}{v_1 - \frac{v_1}{\varepsilon}},$$

$$q_1 = q_1^v + q_1^p = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3),$$

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1),$$

$$\underline{T_2} = T_1 \varepsilon^{k-1}, \quad \underline{T_3} = \lambda \varepsilon^{k-1} T_1, \quad T_4 = \rho \lambda \varepsilon^{k-1} T_1, \quad \underline{T_5} = T_1 \lambda \rho^k.$$

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) - c_v(T_5 - T_1)}{v_1 - \frac{v_1}{\varepsilon}} = \\ &= \frac{c_v \left[ \left( \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right) + k \left( \frac{T_4}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \right) - \left( \frac{T_5}{T_1} - 1 \right) \right]}{\frac{v_1}{T_1} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)} = \\ &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \frac{c_v}{R} \left[ (\lambda \varepsilon^{k-1} - \varepsilon^{k-1}) + k (\rho \lambda \varepsilon^{k-1} - \lambda \varepsilon^{k-1}) - (\lambda \rho^k - 1) \right] = \\ &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \frac{1}{k-1} \left\{ \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)] - (\lambda \rho^k - 1) \right\}. \end{aligned}$$

## 4. ЦИКЛ КАРНО



**Никола Леонард Сади Карно** (1796–1832) – французский физик и военный инженер, один из создателей термодинамики. Им были введены основные понятия термодинамики: идеальная тепловая машина, идеальный цикл, обратимость и необратимость термодинамических процессов.

В 1812 году блестяще окончил лицей Карла Великого и поступил в Политехническую школу в Париже – лучшее на тот момент учебное заведение Франции. В 1814 году он окончил Парижскую Политехнику шестым по успеваемости и был направлен в Инженерную школу в городе Мец, после окончания которой в 1816 году был распределен в инженерный полк, где провел несколько лет. В 1819 году он выиграл конкурс на замещение вакансии в Главном штабе корпуса в Париже и перебрался туда. В Париже Карно продолжил обучение. Посещал лекции в Сорбонне, Коллеж де Франс, Консерватории Искусств и Ремесел. В 1824 году вышла первая и единственная работа Сади Карно – «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Эта работа считается основополагающей в термодинамике. В ней был произведен анализ существовавших в то время паровых машин, были выведены условия, при которых КПД достигает максимального значения (в паровых машинах того времени КПД не превышал 2 %).

При работе тепловой машины рабочее тело совершает замкнутый термодинамический цикл. Для любой реальной тепловой машины весь цикл, включая его отдельные процессы, необратим, что вызывает необходимость затрачивать часть произведенной работы для перевода рабочего тела в первоначальное состояние, обеспечивая замыкание кругового процесса. Указанные потери приводят к тому, что не вся произведенная работа становится полезной, а часть ее теряется в самой тепловой машине, переходя в теплоту.

На рис. 4.1 показаны тепловая машина Карно, в которой рабочее тело совершает цикл между нагревателем и холодильником, и  $p, v$ -диаграмма цикла Карно.

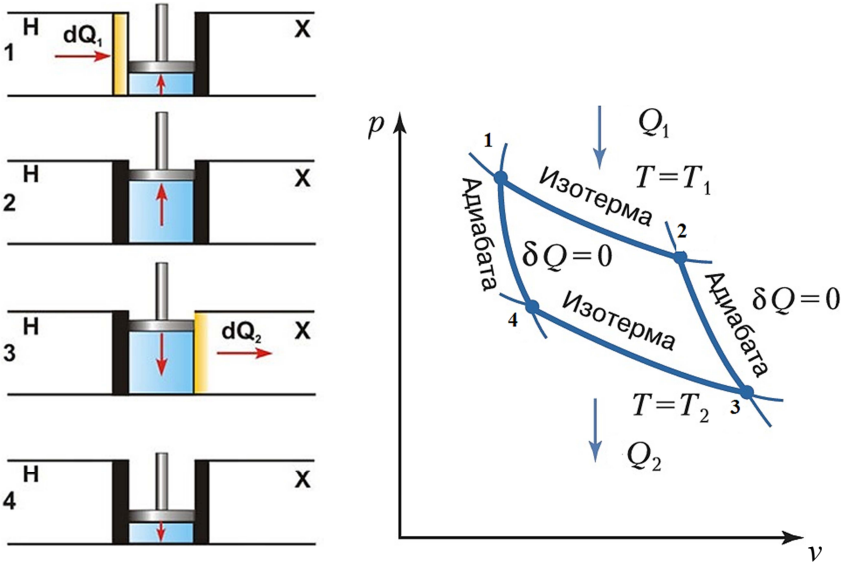


Рис. 4.1. Тепловая машина Карно и цикл Карно:  
*H* – нагреватель; *X* – холодильник

Максимальным КПД обладает тепловая машина, в которой цикл рабочего тела состоит только из равновесных тепловых процессов, и, следовательно, является обратимым. Однако для осуществления нагрева и охлаждения необходим теплообмен рабочего тела с нагревателем и холодильником тепловой машины, который тем более эффективен, чем заметнее разность температур. Возникающие при этом тепловые потоки нарушают состояние теплового равновесия и делают эти процессы необратимыми. Чтобы избежать этого, необходимо теплообмен осуществлять при очень малой разности температур, в пределе, для достижения равновесного процесса, при бесконечно малой разности. Поэтому реализовать равновесный процесс при теплообмене можно только в случае теплового равновесия рабочего тела и нагревателя (или холодильника).

Таким образом, теплообмен с нагревателем и холодильником в рассматриваемой тепловой машине должен происходить при изотермических процессах, что эквивалентно требованию бесконечной медленности протекания этих процессов. Очевидно, что такое условие может быть выполнено только приближенно.



Другой процесс, который может протекать без возникновения тепловых потоков – это адиабатический процесс. Если он протекает бесконечно медленно, то такой процесс является равновесным и обратимым.

Указанные два равновесных процесса (изотермический и адиабатический) могут быть использованы для составления обратимого цикла. Такой обратимый круговой процесс, в принципе, может состоять из большого, в пределе даже бесконечного, числа следующих друг за другом изотермических и адиабатических процессов. Однако, для организации простейшего кругового процесса достаточно использования двух изотерм и двух адиабат. Такой равновесный термодинамический цикл получил название *цикла Карно*. Возможность осуществления такого циклического процесса связана с тем, что с помощью адиабатического процесса всегда возможен переход между любыми изотермами, а с помощью изотермического – между любыми адиабатами.

Обратимый цикл Карно состоит из двух изотерм, описывающих процесс теплопередачи от нагревателя к рабочему телу и от рабочего тела к холодильнику, и двух адиабат, описывающих расширение и сжатие рабочего тела в тепловой машине. Температура нагревателя считается равной  $T_1$ , а температура холодильника – соответственно  $T_2$ . При этом температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$  постоянны, что должно обеспечиваться бесконечно большой теплоемкостью используемых тепловых резервуаров.

1–2 – идеальный газ, находящийся в цилиндре под поршнем, в процессе изотермического расширения ( $T_1 = \text{const}$ ) приводится в тепловой контакт с нагревателем, который передает идеальному газу теплоту  $Q_1$ .

2–3 – в состоянии 2 газ полностью теплоизолируется от нагревателя. Происходит адиабатическое его расширение и температура понижается до  $T_2$ .

3–4 – в состоянии 3 идеальный газ приводится в контакт с холодильником. Происходит изотермическое сжатие ( $T_2 = \text{const}$ ), при котором идеальный газ передает холодильнику теплоту  $Q_2$ .

4–1 – в состоянии 4 газ теплоизолируется от холодильника. Затем происходит адиабатическое сжатие. Температура газа повышается до  $T_1$ .

Работа, производимая газом при расширении – площадь под линией 1–2–3, работа, производимая над газом при сжатии – площадь под линией 3–4–1. Полезная работа за цикл 1–2–3–4–1.

Определим термический КПД цикла Карно. Предположим, рабочим телом цикла является идеальный газ с постоянной теплоемкостью. Так как у идеального газа внутренняя энергия зависит от температуры,

$$du = c_v dT.$$

Уравнение первого закона термодинамики для идеального газа

$$dq = c_v dT + pdv.$$

Для изотермического процесса  $dT = 0$ , следовательно,

$$dq = pdv.$$

Для идеального газа в соответствии с уравнением Клапейрона

$$p = \frac{RT}{v},$$

$$dq = RT \frac{dv}{v},$$

$$q = RT \ln \left( \frac{v_{II}}{v_I} \right).$$

Индексы I и II относятся к начальной и конечной точкам процесса. Если в изотермическом процессе идеальный газ расширяется, то  $v_{II} > v_I$ ,  $q_{I-II} > 0$  (теплота подводится, чтобы температура осталась неизменной). Если газ сжимается, то  $v_{II} < v_I$ ,  $q_{I-II} < 0$ .

В адиабатном процессе  $dq = 0$ , следовательно, уравнение первого закона термодинамики будет иметь вид

$$dq = c_v dT + pdv = 0,$$

$$pdv = -c_v dT.$$

Разделим почленно на уравнение Клапейрона  $pv = RT$ .

Получим

$$\frac{p dv}{pv} = -\frac{c_v dT}{RT},$$
$$\frac{dv}{v} = -\frac{c_v}{c_p - c_v} \frac{dT}{T}.$$

Из формулы Майера

$$R = c_p - c_v,$$
$$\frac{dv}{v} = -\frac{c_v}{R} \frac{dT}{T},$$
$$\frac{c_p - c_v}{c_v} \frac{dv}{v} = -\frac{dT}{T}.$$

Показатель адиабаты

$$\frac{c_p}{c_v} = k,$$
$$(k-1) \frac{dv}{v} = -\frac{dT}{T},$$
$$(k-1) \int_{v_I}^{v_{II}} \frac{dv}{v} = -\int_{T_I}^{T_{II}} \frac{dT}{T} = \int_{T_{II}}^{T_I} \frac{dT}{T},$$
$$(k-1) \ln\left(\frac{v_{II}}{v_I}\right) = \ln\left(\frac{T_I}{T_{II}}\right).$$

Считаем величину показателя адиабаты, не зависящей от температуры. Следовательно,

$$\left(\frac{v_{II}}{v_I}\right)^{k-1} = \left(\frac{T_I}{T_{II}}\right).$$

Применительно к изотермическим процессам в цикле Карно подведенная теплота

$$q_1 = RT_1 \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right).$$

Отведенная теплота

$$q_2 = RT_2 \ln \left( \frac{v_3}{v_4} \right).$$

Термический КПД цикла Карно

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{RT_1 \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) - RT_2 \ln \left( \frac{v_3}{v_4} \right)}{RT_1 \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)}.$$

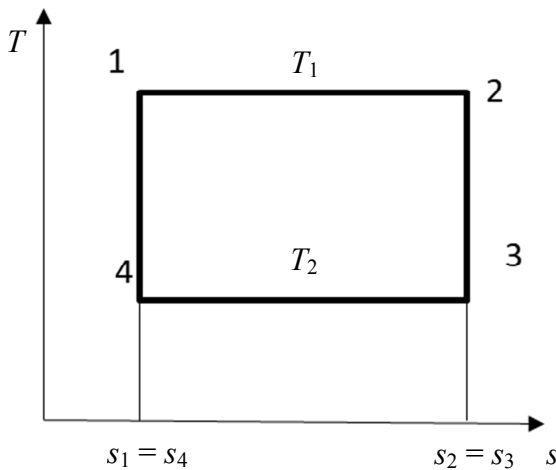


Рис. 4.2. Диаграмма цикла Карно ( $T, s$ )

Так как в цикле Карно адиабатные процессы 2–3 и 4–1 осуществляются между теми же температурами  $T_1$  и  $T_2$ , для каждой адиабаты

$$\left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right),$$

$$\left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right).$$

Следовательно,

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1}, \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}.$$

Тогда

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, зависит только от температур нагревателя и холодильника, не зависит от устройства машины и вида рабочего тела.

## 5. ЦИКЛ СТИРЛИНГА



**Роберт Стирлинг** (25.10.1790, Клог Фарм, Шотландия – 6 июня 1878, Галстон, Шотландия) – шотландский священник, изобретатель двигателя Стирлинга. Стирлинг был весьма обеспокоен травматизмом рабочих, работающих в его приходе с паровыми двигателями. Эти двигатели часто взрывались из-за низкого качества металла, из которого они изготавливались. Более прочного материала в те годы не существовало. Стирлинг решил усовершенствовать конструкцию теплового двигателя, сделав его более безопасным. Стир-

линг придумал устройство, которое он назвал «эконом тепла» (сейчас такое устройство называют регенератором или теплообменником). Это устройство служит для повышения тепловой эффективности различных процессов.

Основной принцип работы двигателя Стирлинга заключается в постоянно чередуемых нагревании и охлаждении рабочего тела в закрытом цилиндре. Обычно в роли рабочего тела выступает воздух, но также используются водород и гелий. В ряде опытных образцов испытывались фреоны, двуокись азота, сжиженный пропан-бутан и вода.

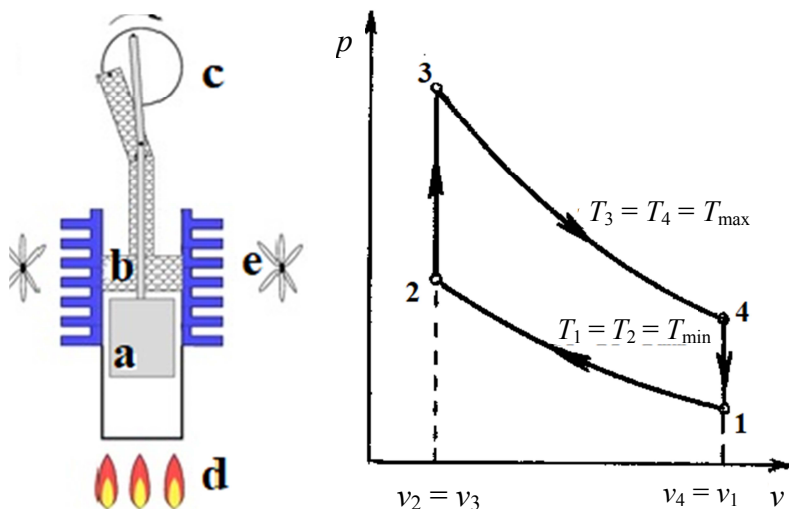


Рис. 5.1. Двигатель Стирлинга. Диаграмма цикла Стирлинга ( $P, v$ ):  
*a* – вытеснительный поршень; *b* – рабочий поршень; *c* – маховик;  
*d* – область нагревания; *e* – область охлаждения

Цикл Стирлинга состоит из четырех фаз и разделен двумя переходными фазами: нагрев, расширение, переход к источнику холода, охлаждение, сжатие и переход к источнику тепла. Таким образом, при переходе от горячего источника к холодному происходит расширение и сжатие газа, находящегося в цилиндре. При этом изменяется давление, за счет чего можно получить полезную работу.

При нагревании газ совершает работу (например, толкает поршень) и охлаждается. Сжать охлажденный газ проще, чем удержать

расширяющийся горячий (на сжатие холодного газа «расходуется» меньше работы, чем ее высвобождается при нагревании и расширении того же самого газа). Это свойство газов и лежит в основе работы двигателя Стирлинга.

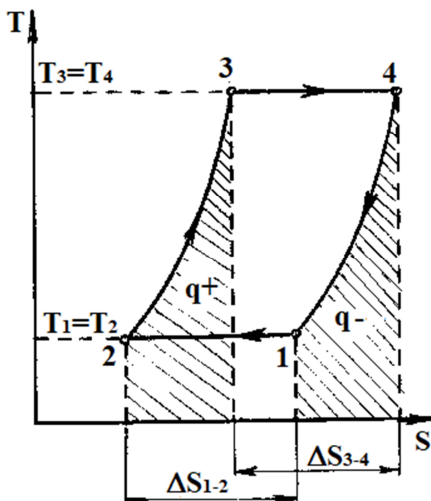


Рис. 5.2.  $T, s$ -диаграмма цикла Стирлинга

Нагрев и охлаждение рабочего тела производится вытеснителем. В идеале количество тепла, отдаваемое и отбираемое вытеснителем, одинаково. Полезная работа производится только за счет изотерм, то есть зависит от разницы температур нагревателя и охладителя, как в цикле Карно.

1–2 – воздух сжимается, от него отводится теплота (при  $T_{\min} = \text{const}$ ), рабочий поршень опускается вниз;

2–3 – вытеснительный поршень поднимается вверх, тем самым перемещая охлажденный воздух в нижнюю часть ( $v = \text{const}$ );

3–4 – внешний источник тепла нагревает газ в нижней части теплообменного цилиндра. Создаваемое давление толкает рабочий поршень вверх (вытеснительный поршень неплотно прилегает к стенкам). Воздух расширяется, к нему подводится теплота (при  $T_{\max} = \text{const}$ );

4–1 – маховик толкает вытеснительный поршень вниз, тем самым перемещая разогретый воздух из нижней части в охлаждающую камеру ( $v = \text{const}$ ).

Подведенная теплота

$$q_1 = RT_3 \ln \frac{v_4}{v_3}.$$

Отведенная теплота

$$q_2 = RT_1 \ln \frac{v_1}{v_2}.$$

Термический КПД

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{RT_3 \ln \frac{v_4}{v_3} - RT_1 \ln \frac{v_1}{v_2}}{RT_3 \ln \frac{v_4}{v_3}},$$

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_3 - T_1}{T_3} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}.$$

Двигатель Стирлинга использует цикл Стирлинга, который по термодинамической эффективности не уступает циклу Карно и даже обладает преимуществом. Дело в том, что цикл Карно состоит из мало отличающихся между собой изотерм и адиабат. Практическое воплощение этого цикла малоперспективно. Цикл Стирлинга позволил получить работающий на практике двигатель в приемлемых размерах.



## 6. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ

На рис. 6.1 приведены  $p, v$ -диаграммы циклов Карно, Отто, Дизеля и Тринклера.

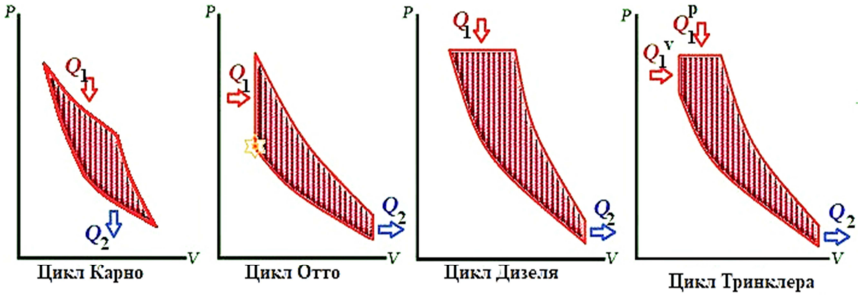


Рис. 6.1. Циклы тепловых двигателей в  $p, v$ -диаграмме

Сравнительный анализ эффективности циклов приведен на рис. 6.2.

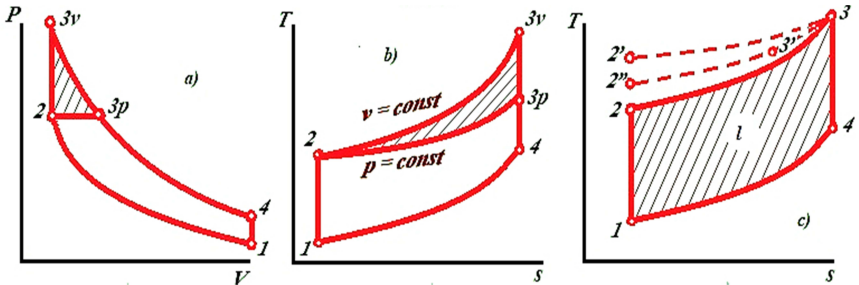


Рис. 6.2. Сравнение эффективности циклов двигателей внутреннего сгорания

На рис. 6.2 изображены циклы Отто ( $123^v41$ ), Дизеля ( $123^p41$ ), Тринклера ( $12''3''341$ ). Процессы сжатия  $1-2$  у всех трех типов двигателей совпадают, а при отводе одинакового количества теплоты совпадают и процессы  $4-1$ .

В  $T, s$ -диаграмме изохора идет круче изобары, следовательно, в карбюраторном двигателе при одинаковом количестве подведенной теплоты совершается большая работа на величину заштрихованной площади. Следовательно, изохорное сжигание топлива эффективнее изобарного. Однако двигатели работают при разных сте-

пенях сжатия, и интерес представляет сравнение их эффективности при одинаковых максимальных температурах сгорания (рис. 6.2). Здесь точки 3 для циклов Отто, Дизеля и Тринклера совпадают (одинаковая максимальная температура цикла и одинаковое количество отводимой теплоты).  $1-2$ ,  $1-2'$ ,  $1-2''$  – адиабатное сжатие в циклах Отто, Дизеля и Тринклера,  $2$  – изохорный подвод теплоты в цикле Отто,  $2'-3$  – изобарный подвод теплоты в цикле Дизеля,  $2''-3'$ ,  $3'-3$  – соответственно изохорный и изобарный подводы теплоты в цикле Тринклера. Остальные процессы – адиабатное расширение ( $3-4$ ) (рабочий ход) и изохорный отвод теплоты ( $4-1$ ) одинаковы для всех трех циклов. Максимальная полезная работа цикла ( $l$ ) (площадь внутри цикла) и, соответственно, максимальный термический КПД имеют место в цикле Дизеля, минимальный – в цикле Отто. Цикл Тринклера по эффективности занимает промежуточное значение между ними.

## 7. ЗАДАЧИ

1. Построить график, иллюстрирующий зависимость термического КПД от степени сжатия для цикла поршневого ДВС с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ , изменяя его от 3 до 8 (табл. 7.1). Показатель политропы  $n = 1,3$ . Начальное состояние рабочего тела  $p_1 = 0,09$  МПа,  $t_1 = 20$  °С. Определить параметры в точке 2.

Рассчитываем цикл:

Точка 1:

$$p_1 = 0,09 \text{ МПа}, \quad t_1 = 20 \text{ °С},$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314 (273,15 + 20)}{29 (0,0910^6)} = 0,934 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,934}{3} = 0,311,$$

$$p_2 = p_1 \varepsilon^n = (0,09 \cdot 10^6) \cdot 4,171 = 375390 \text{ Па},$$

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{n-1} = 293,15 \cdot 1,390 = 407,48.$$

Таблица 7.1

|                             |        |        |        |        |         |         |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| $\varepsilon$               | 3      | 4      | 5      | 6      | 7       | 8       |
| $\varepsilon^n$             | 4,171  | 6,063  | 8,103  | 10,271 | 12,550  | 14,929  |
| $\varepsilon^{n-1}$         | 1,390  | 1,516  | 1,621  | 1,712  | 1,793   | 1,866   |
| $\frac{n-1}{\varepsilon^n}$ | 1,289  | 1,377  | 1,450  | 1,513  | 1,568   | 1,617   |
| $v_2, \text{м}^3/\text{кг}$ | 0,311  | 0,234  | 0,187  | 0,156  | 0,133   | 0,117   |
| $p_2, \text{Па}$            | 375390 | 545670 | 729270 | 924390 | 1129500 | 1343610 |
| $T_2, \text{К}$             | 407,48 | 444,42 | 475,20 | 501,87 | 525,62  | 547,02  |
| $\eta_t$                    | 0,224  | 0,274  | 0,310  | 0,339  | 0,362   | 0,382   |

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^n} = 1 - \frac{1}{3^{1,3}} = 0,224.$$

На рис. 7.1 показана зависимость КПД цикла Отто от степени сжатия.

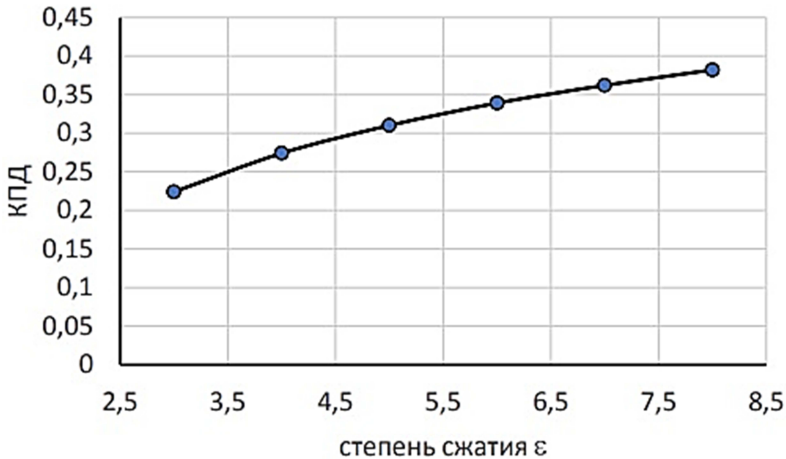


Рис. 7.1. Зависимость КПД Цикла Отто от степени сжатия

2. Двигатель работает по циклу с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ . Начальная температура рабочего тела, обладающего свойствами воздуха,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 5$ . При сгорании выделяется энергия в количестве  $800 \text{ кДж/кг}$ . Определить количество отведен-

ной теплоты, работу цикла, не учитывая зависимость теплоемкости от температуры.

Теплоемкость воздуха

$$c_v = \frac{5}{2}R = \frac{5}{2} \cdot \frac{8314}{29} = 716,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,7167 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Из выражений

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} = 293,15 \cdot 5^{1,4-1} = 558,06,$$

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2),$$

$$(T_3 - T_2) = \frac{q_1}{c_v} = \frac{800}{0,7167} = 1116,23,$$

следовательно

$$T_3 = T_2 + 1116,22 = 558,06 + 1116,23 = 1674,3.$$

Степень увеличения давления

$$\lambda = \frac{T_3}{T_2} = \frac{1674,3}{558,06} = 3,0,$$

$$T_4 = \lambda T_1 = 3 \cdot 293,15 = 879,5.$$

Отведенная теплота

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = 0,7167 (879,5 - 293,15) = 420,25 \text{ кДж/кг}.$$

Работа цикла

$$l = q_1 - q_2 = 800 - 420,25 = 379,75 \text{ кДж/кг}.$$

3. Для цикла с подводом теплоты при  $\nu = \text{const}$  определить среднее индикаторное давление. Начальные параметры  $p_1 = 0,0981 \text{ Па}$ ,  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 4$ ,

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} = 3,5.$$

Среднее индикаторное давление – отношение работы цикла к удельному рабочему объему цилиндра двигателя (некое условное постоянное давление, действующее в течение хода расширения и создающее работу, равную работе соответствующей индикаторной диаграммы).

$$p_i = \frac{l}{v_1 - v_2} = \frac{c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{v_1 - \frac{v_1}{\varepsilon}} = \frac{c_v \left[ \left( \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right) - \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right) \right]}{\frac{1}{T_1} v_1 \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)},$$

$$p_i = \frac{c_v \left[ \left( \lambda \varepsilon^{k-1} - \varepsilon^{k-1} \right) - (\lambda - 1) \right]}{\frac{R}{p_1} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \frac{c_v}{R} \left[ \left( \varepsilon^{k-1} - 1 \right) (\lambda - 1) \right];$$

$$p_i = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{1}{k - 1} p_1 \left[ \left( \varepsilon^{k-1} - 1 \right) (\lambda - 1) \right];$$

$$p_i = \frac{4}{4 - 1} \frac{1}{1,4 - 1} 0,0981 \left[ \left( 4^{1,4-1} - 1 \right) (3,5 - 1) \right] = 0,605 \text{ МПа.}$$

4. Для цикла с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  определить полезную работу, отнесенную к 1 кг рабочего тела, и термический КПД, если  $p_1 = 0,098$  Па,  $t_1 = 50$  °С,  $\varepsilon = 15$ ,  $k = 1,4$ ,  $\rho = 1,8$ .

Рассчитываем цикл.

Точка 1:

$$p_1 = 0,098 \text{ МПа, } t_1 = 50 \text{ °С,}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314(50 + 273,15)}{29 \cdot 0,098 \cdot 10^6} = 0,945 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,945}{15} = 0,063 \text{ м}^3/\text{кг,}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k \Rightarrow p_2 = p_1 \varepsilon^k = 0,098 \cdot 10^6 \cdot 15^{1,4} = 4,342 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} = (50 + 273,15) \cdot 15^{1,4-1} = 954,64 \text{ К.}$$

Точка 3:

$$v_3 = \rho v_2 = \rho \frac{v_1}{\varepsilon} = 1,8 \frac{0,945}{15} = 0,113 \text{ м}^3/\text{кг,}$$

$$p_3 = p_2 = \varepsilon^k p_1 = 0,098 \cdot 10^6 \cdot 15^{1,4} = 4,342 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_3 = \rho T_2 = \rho \varepsilon^{k-1} T_1 = 1,8 \cdot 15^{1,4-1} \cdot (50 + 273,15) = 1718,35 \text{ К.}$$

Точка 4:

$$v_4 = v_1 = 0,945 \text{ м}^3/\text{кг,}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = \left(\frac{\rho v_1}{\varepsilon \cdot v_1}\right)^k = \frac{\rho^k}{\varepsilon^k} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_4 = p_3 \frac{\rho^k}{\varepsilon^k} = \frac{\rho^k \varepsilon^k p_1}{\varepsilon^k} = \rho^k p_1 = 1,8^{1,4} \cdot 0,098 \cdot 10^6 = 0,223 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

$$\rho^k = \frac{p_4}{p_1} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow T_4 = \rho^k T_1 = 1,8^{1,4} (50 + 273,15) = 735,84 \text{ К.}$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = \frac{7}{2} \cdot \frac{8,314}{29} (1718,35 - 954,64) = 766,32 \text{ кДж/кг.}$$

Количество отведенной теплоты

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314}{29} (735,84 - 323,15) = 295,78 \text{ кДж/кг.}$$

Работа цикла

$$l = q_1 - q_2 = 766,32 - 295,78 = 470,54 \text{ кДж/кг.}$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{766,32 - 295,78}{766,32} = 0,614.$$

5. В цикле с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  при начальных параметрах  $p_1 = 0,085 \text{ Па}$ ,  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , подведенная теплота составляет  $800 \text{ кДж/кг}$ ,  $\varepsilon = 15$ ,  $k = 1,4$ . Определить термический КПД и полезную работу за цикл, отнесенную к  $1 \text{ кг}$  рабочего тела. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Рассчитываем цикл.

Точка 1:

$$p_1 = 0,085 \text{ МПа}, \quad t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314(30 + 273,15)}{29 \cdot 0,085 \cdot 10^6} = 1,022 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,022}{15} = 0,068 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k \Rightarrow p_2 = p_1 \varepsilon^k = 0,085 \cdot 10^6 \cdot 15^{1,4} = 3,767 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} = (30 + 273,15) \cdot 15^{1,4-1} = 895,56 \text{ К.}$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = 800 \text{ кДж/кг},$$

$$c_p = \frac{7}{2} \cdot \frac{8,314}{29} = 1,003 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$(T_3 - T_2) = \frac{q_1}{c_p} = \frac{800}{1,003} = 797,61.$$

Точка 3:

$$T_3 = T_2 + 797,61 = 895,56 + 797,61 = 1693,17 \text{ К},$$

$$p_3 = p_2 = \varepsilon^k p_1 = 0,085 \cdot 10^6 \cdot 15^{1,4} = 3,767 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{8314 \cdot 1693,17}{29 \cdot 3,767 \cdot 10^6} = 0,129 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 4:

$$v_4 = v_1 = 1,022 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k \Rightarrow p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = 3,767 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,129}{1,022}\right)^{1,4} = 0,208 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = \frac{0,208 \cdot 10^6 \cdot 1,022}{\frac{8314}{29}} = 741,47 \text{ К}.$$

Отведенная теплота

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314}{29} (741,47 - 303,15) = 314,10 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$



Работа цикла

$$l = q_1 - q_2 = 800 - 314,10 = 485,90 \text{ кДж/кг.}$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{800 - 314,10}{800} = 0,607.$$

6. Для цикла Дизеля, рабочее тело которого обладает свойствами воздуха, заданы температуры, соответствующие следующим точкам цикла:  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_4 = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить термический КПД и сравнить его с термическим КПД цикла Карно в том же интервале температур.

$$\frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1} = \frac{(700 + 273,15)}{(30 + 273,15)} = 3,21 = \varepsilon^{1,4-1} = \varepsilon^{0,4} \Rightarrow \varepsilon = 3,21^{\frac{1}{0,4}} = 18,46,$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \rho^k = \frac{(280 + 273,15)}{(30 + 273,15)} = 1,825 = \rho^{1,4} \Rightarrow \rho = 1,825^{\frac{1}{1,4}} = 1,537,$$

$$T_3 = \rho T_2 = 1,537 \cdot (700 + 273,15) = 1495,73.$$

Термический КПД

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \cdot (\rho - 1)} = 1 - \frac{1,825 - 1}{1,4 \cdot 18,46^{0,286} (1,537 - 1)} =$$
$$= 1 - 0,476 = 0,524,$$

$$\eta_t^{\text{Карно}} = \frac{T_3 - T_1}{T_3} = \frac{1495,73 - 303,15}{1495,73} = 0,8.$$

7. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом теплоты начальные параметры  $p_1 = 0,085$  МПа,  $t_1 = 30$  °С;  $\varepsilon = 9$ ,  $\lambda = 2,5$ ,  $\rho = 1,5$ .

Определить параметры в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и термический КПД. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

*Точка 1:*

$$p_1 = 0,085 \text{ МПа}, \quad t_1 = 30 \text{ °С},$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314}{29} \cdot \frac{(30 + 273,15)}{0,085 \cdot 10^6} = 1,022 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

*Точка 2:*

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,022}{9} = 0,114 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$p_2 = p_1 \varepsilon^k = 0,085 \cdot 10^6 \cdot 9^{1,4} = 1,842 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} = 303,15 \cdot 9^{1,4-1} = 730,05 \text{ К}.$$

*Точка 3:*

$$p_3 = \lambda \varepsilon^k p_1 = 2,5 \cdot 9^{1,4} \cdot 0,085 \cdot 10^6 = 1,842 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$v_3 = v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,022}{9} = 0,114 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$T_3 = \lambda \varepsilon^{k-1} T_1 = 2,5 \cdot 9^{1,4-1} \cdot 303,15 = 1825,13 \text{ К}.$$

*Точка 4:*

$$p_4 = \lambda \varepsilon^k p_1 = 2,5 \cdot 9^{1,4} \cdot 0,085 \cdot 10^6 = 4,606 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$v_4 = \frac{\rho}{\varepsilon} v_1 = \frac{1,5}{9} \cdot 1,022 = 0,170 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$T_4 = \rho \lambda \varepsilon^{k-1} T_1 = 1,5 \cdot 2,5 \cdot 9^{1,4-1} \cdot 303,15 = 2737,7 \text{ К}.$$

Точка 5:

$$\underline{v}_5 = v_1 = 1,022 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\underline{p}_5 = \lambda \rho^k p_1 = 2,5 \cdot 1,5^{1,4} \cdot 0,085 \cdot 10^6 = 0,375 \cdot 10^6,$$

$$\underline{T}_5 = T_1 \lambda \rho^k = 303,15 \cdot 2,5 \cdot 1,5^{1,4} = 1337 \text{ К}.$$

Подведенная теплота

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1^v + q_1^p = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) = c_v [(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)] = \\ &= \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314}{29} [(1825,13 - 730,05) + 1,4(2737,7 - 1825,13)] = \\ &= 1700,39 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Отведенная теплота

$$q_2 = c_v (T_5 - T_1) = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314}{29} (1337 - 303,15) = 741 \text{ кДж/кг}.$$

Работа цикла

$$l = q_1 - q_2 = 1700,39 - 741 = 959,39 \text{ кДж/кг}.$$

Термический КПД цикла Тринклера

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1^v + q_1^p} = 1 - \frac{741}{1700,39} = 0,564.$$

**8.** Для цикла внутреннего сгорания с комбинированным подводом теплоты расход топлива составляет 0,035 кг на 1 кг рабочего тела. Начальные параметры  $p_1 = 0,088 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Степень сжатия  $\varepsilon = 10$ . Максимальное давление в цикле  $p_3 = 4 \text{ МПа}$ . Теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 29,3 \text{ МДж/кг}$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Рассчитать параметры во всех

точках цикла. Определить термический КПД и долю теплоты, подведенной в процессе  $p = \text{const}$ .

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314}{29} \cdot \frac{(50 + 273,15)}{0,088 \cdot 10^6} = 1,053 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\underline{v_2} = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,053}{10} = 0,105 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\underline{p_2} = p_1 \varepsilon^k = 0,088 \cdot 10^6 \cdot 10^{1,4} = 2,210 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$\underline{T_2} = T_1 \varepsilon^{k-1} = 323,15 \cdot 10^{1,4-1} = 811,72 \text{ К},$$

$$\underline{p_3} = 4 \cdot 10^6 \text{ Па} = \lambda \varepsilon^k p_1 = \lambda \cdot 10^{1,4} \cdot 0,088 \cdot 10^6.$$

$$\lambda = \frac{4 \cdot 10^6}{10^{1,4} \cdot 0,088 \cdot 10^6} = 1,8,$$

$$\underline{v_3} = v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,053}{10} = 0,105 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\underline{T_3} = \lambda \varepsilon^{k-1} T_1 = 1,8 \cdot 10^{1,4-1} \cdot 323,15 = 1461,09 \text{ К},$$

$$q_1 = q_1^v + q_1^p = 29300 \cdot 0,035 = 1025 \text{ кДж/кг},$$

$$\underline{p_4} = p_3 = 4 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$\underline{v_4} = \frac{p}{\varepsilon} v_1 = \frac{1,5}{9} 1,022 = 0,170 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$q_1 = q_1^v + q_1^p = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) = c_v [(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)],$$

$$k(T_4 - T_3) = \frac{q_1}{c_v} - (T_3 - T_2).$$

$$T_4 = T_3 + \frac{\frac{q_1}{c_v} - (T_3 - T_2)}{k} = 1461,09 + \frac{\frac{1025}{0,716} - (1461,09 - 811,72)}{1,4} =$$

$$= 2019,8 \text{ К},$$

$$T_4 = \rho \lambda \varepsilon^{k-1} T_1 = \rho \cdot 1,8 \cdot 10^{1,4-1} \cdot 323,15 = 2019,8 \text{ К},$$

$$\rho = \frac{2019,8}{1,8 \cdot 10^{1,4-1} \cdot 323,15} = 1,38,$$

$$\underline{v_4} = \frac{\rho}{\varepsilon} v_1 = \frac{1,38}{10} 1,053 = 0,145 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\underline{v_5} = v_1 = 1,053 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\underline{p_5} = \lambda \rho^k p_1 = 1,8 \cdot 1,38^{1,4} \cdot 0,088 \cdot 10^6 = 0,249 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$\underline{T_5} = T_1 \lambda \rho^k = 323,15 \cdot 1,8 \cdot 1,38^{1,4} = 913,08 \text{ К}.$$

Отведенная теплота

$$q_2 = c_v (T_5 - T_1) = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314}{29} (913,08 - 323,15) = 422,82 \text{ кДж/кг},$$

$$q_1^p = c_p (T_4 - T_3) = \frac{7}{2} \cdot \frac{8,314}{29} (2019,8 - 1461,09) = 560,62 \text{ кДж/кг},$$

$$\frac{q_1^p}{q_1} = \frac{560,62}{1025} = 0,547,$$

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{1025 - 422,82}{1025} = 0,587.$$

9. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя  $t_1 = 400$  °С, температура холодильника  $t_2 = 20$  °С. Время, за которое осуществляется цикл Карно,  $\tau = 1$  с. Найти мощность двигателя, работающего по этому циклу, если известно, что рабочим телом служат  $G = 3$  кг воздуха; давление в конце изотермического расширения равно давлению в начале адиабатного сжатия.

КПД цикла Карно

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{L}{Q_1} = \frac{(400 + 273,15) - (20 + 273,15)}{(400 + 273,15)} = 0,565.$$

Теплота, подведенная в цикле (в изотермическом процессе 1-2)

$$Q_1 = GRT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Удельная газовая постоянная воздуха

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8,314}{29} \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

Работа цикла

$$L = \eta_t \cdot Q_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot GRT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

По условию  $p_2 = p_4$ .

Следовательно,

$$L = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot GRT_1 \ln \frac{p_1}{p_4} = (T_1 - T_2) \cdot GR \ln \frac{p_1}{p_4}.$$

В адиабатном процессе 4-1

$$\frac{p_1}{p_4} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

$$\ln \frac{p_1}{p_4} = \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{k}{k-1} \ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{1,4}{1,4-1} \ln \frac{673,15}{293,15} = 3,5 \ln 2,296 = 2,91,$$

$$N = \frac{L}{\tau} = \frac{(T_1 - T_2) \cdot GR \ln \frac{p_1}{p_4}}{1} = (673,15 - 293,15) \cdot 3 \cdot \frac{8,314}{29} \cdot 2,91 = 951,1 \text{ кВт.}$$

## 8. ВОПРОСЫ

1. КПД тепловой машины равен 20 %. Чему равен КПД, если потери тепла уменьшить на 50 %?

а) 30 %; б) 70 %; в) 60 %; г) 40 %; д) 50 %.

2. Тепловая машина на цикл от нагревателя получает количество теплоты 100 Дж и отдает холодильнику 75 Дж. Чему равен КПД машины?

а) 20 %; б) 40 %; в) 80 %; г) 25 %; д) 32 %.

3. Газ в идеальной тепловой машине отдает холодильнику 60 % теплоты, полученной от нагревателя. Какова температура холодильника, если температура нагревателя 450 К?

а) 270 К; б) 200 К; в) 300 К; г) 323 К; д) 273 К.

4. Идеальная тепловая машина, работая от нагревателя с температурой  $T_1 = 750 \text{ К}$ , за некоторое время совершила работу  $L = 300 \text{ Дж}$ . Какое количество теплоты за это время передано холодильнику, если его температура  $T_2 = 300 \text{ К}$ ?

а) 100 Дж; б) 250 Дж; в) 50 Дж; г) 200 Дж; д) 150 Дж.

5. В идеальной тепловой машине за счет каждого килоджоуля теплоты, получаемой от нагревателя, совершается 300 Дж работы. Если температура холодильника машины равна  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ , то температура нагревателя составляет

а)  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б)  $414 \text{ }^\circ\text{C}$ ; в)  $297 \text{ }^\circ\text{C}$ ; г)  $687 \text{ }^\circ\text{C}$ ; д)  $141 \text{ }^\circ\text{C}$ .

6. Тепловая машина имеет КПД 40 %. Каким станет КПД машины, если количество теплоты, потребляемое за цикл, увеличится на 20 %, а количество теплоты, отдаваемое холодильнику, уменьшится на 10 %?

а) 75 %; б) 55 %; в) 45 %; г) 35 %; д) 25 %.

7. Тепловая машина отдает холодильнику 600 кДж теплоты. Определите количество теплоты, получаемой машиной от нагревателя, если его температура 127 °С, а температура холодильника 27 °С.

а) 1000 кДж; б) 960 кДж; в) 750 кДж; г) 800 кДж; д) 1200 кДж.

8. С одним моле идеального одноатомного газа, в осях  $p, V$ , осуществляется цикл, в котором 1–2 – изохора, 3–4 – изобара, 2–3 – процесс с линейной зависимостью давления от объема. Определите КПД цикла. Известно, что в первом состоянии –  $p_0, V_0$ , во втором –  $3p_0, V_0$ , в третьем –  $p_0, 3V_0$ .

а) 17 %; б) 42 %; в) 25 %; г) 31 %; д) 29 %.

9. КПД тепловой машины 41 %. Каким станет КПД, если теплота, потребляемая за цикл, увеличивается на 18 %, а теплота, отдаваемая холодильнику, уменьшится на 6 %?

а) 37 %; б) 44 %; в) 50 %; г) 57 %; д) 80 %.

10. Цикл бензинового двигателя внутреннего сгорания близок к циклу Отто, состоящему из двух адиабат и двух изохор. Вначале горючую смесь, которую можно считать идеальным газом, сжимают без теплообмена с окружающей средой, потом изохорически нагревают (при сгорании топлива) на  $\Delta T_1 = 500$  К, затем снова без теплообмена с окружающей средой газ расширяется, совершая работу, и наконец, после изохорического охлаждения на  $\Delta T_2 = 250$  К газ возвращается к исходному состоянию. Найти КПД этого цикла. Теплоемкость газа в обоих изохорических процессах считать одинаковой.

а) 0,55; б) 0,5; в) 0,25; г) 0,45; д) 0,75.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика : учебник для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2008. – 495 с.: ил.
2. Теплотехника : учебник для вузов / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. – 7-е изд., испр. – Москва : Высшая школа, 2009. – 671 с.: ил.
3. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для академического бакалавриата / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2015. – 567 с.: ил.
4. Рабинович, О. М. Сборник задач по технической термодинамике : учебное пособие / О. М. Рабинович. – 5-е изд., перераб. – Стереотипное издание. – Москва : Альянс, 2015. – 344 с. : ил. + диаграмма.
5. Зубарев, В. Н. Практикум по технической термодинамике : учебное пособие / В. Н. Зубарев, А. А. Александров, В. С. Охотин. – 3-е изд., перераб. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 303 с.
6. Сборник задач по технической термодинамике : учебное пособие / Т. Н. Андрианова [и др.]; под общ. ред. Т. Н. Андриановой. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2006. – 354 с.
7. Храмов, Ю. А. Физики : биографический справочник / под ред. А. И. Ахиезера. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Наука, 1983. – 400 с.
8. Физическая термодинамика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom2/ch3/text.html/ch3\\_2.htm](http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom2/ch3/text.html/ch3_2.htm). – Дата доступа: 20.08.2020.
9. Булыгин, В. С. Теоремы Карно : учебно-методическое пособие по курсу «Общая физика» / В. С. Булыгин. – Москва : МФТИ, 2012. – 17 с.
10. Научная Россия // Рудольф Дизель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scientificrussia.ru/articles/rudolf-dizel>. – Дата доступа: 20.08.2020.
11. Все о Германии // Знаменитые люди, великие немецкие изобретатели, биографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lgroutes.com/Famous/Originator/Otto.html>. – Дата доступа: 20.08.2020.

12. Каменский агротехнический техникум // Идеальные циклы поршневых двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://k-a-t.ru/teplotexnika/11\\_ideal\\_cikly/index.shtml](http://k-a-t.ru/teplotexnika/11_ideal_cikly/index.shtml). – Дата доступа: 20.08.2020.

13. Альтернативная история [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://althistory.fandom.com/ru/wiki>. – Дата доступа: 20.08.2020.

14. Киров, С. А. Машина Стирлинга : учебное пособие / С. А. Киров, А. Л. Клавсюк, А. М. Салецкий. – Москва : ООП Физ. ф-та МГУ, 2018. – 20 с.

15. Кузнецов, С. И. Физика. Ч. 1. Механика, механические колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика : учебное пособие / С. И. Кузнецов, К. И. Рогозин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – 251 с.

Учебное издание

**ХУТСКАЯ** Наталия Геннадьевна  
**ПАЛЬЧЁНОК** Геннадий Иванович

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЦИКЛОВ  
ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности  
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии  
и энергетический менеджмент»

Редактор *Е. О. Германович*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 22.03.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,91. Уч.-изд. л. 2,27. Тираж 100. Заказ 659.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.