

## Анализ теоретических циклов поршневых двигателей

*Н.А. Сокол, А.Г. Исаев*

*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье рассматривается анализ теоретических циклов двигателей внутреннего сгорания. Представлен цикл Отто, Дизеля и Сабатэ-Тринклера. Теоретический цикл представляет собой замкнутый цикл, происходящий в цилиндрах поршневого двигателя с присущими ему особенностями и допущениями. Каждый такой цикл характеризуется двумя основными показателями, такими как теплоиспользование и работоспособность. При этом теплоиспользование определяется термическим коэффициентом полезного действия. Приведена оценка влияния термодинамических факторов на изменение термического КПД для получения наилучшей экономичности и максимальной удельной работы циклов. Получен термический КПД смешанного цикла. Представлены выводы влияния значения степени сжатия на термический КПД. Проведено сравнение, различных теоретических циклов с точки зрения их экономичности и работоспособности при одинаковых условиях.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, идеальный цикл, термический коэффициент полезного действия, тепловые процессы.

Теория двигателей внутреннего сгорания основана на использовании термодинамических зависимостей и приближения их к действительным условиям путем учета реальных факторов [1,3,4].

При рассмотрении идеальных циклов делаются следующие допущения:

- 1) В цилиндре двигателя находится постоянное, не меняющееся количество рабочего тела, совершающее замкнутый цикл;
- 2) Теплота подводится извне в определенный период цикла;
- 3) Теплоемкость находящегося в цилиндре рабочего тела постоянна;
- 4) Процесс сжатия и расширения протекает без теплообмена с внешней средой (адиабатный процесс);
- 5) Трение между поршнем и стенками цилиндра отсутствует.

Термический КПД теоретических циклов это отношение количества теплоты, превращенной в полезную механическую работу, к общему количеству теплоты, подведенной к рабочему телу [1,2].

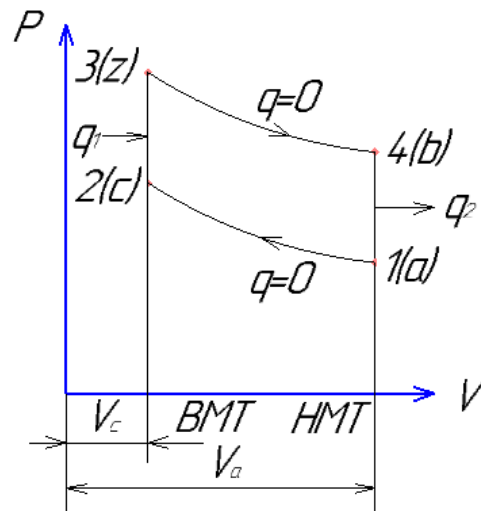


Рис. 1. - Цикл Отто

- 1 – 2 (а–с) – процесс сжатия (адиабатный);
- 2 – 3 (с –z) – подвод тепла (изохорный процесс);
- 3 – 4 (z–b) – расширение (адиабатный процесс);
- 4 – 1 (b–a) – отвод тепла (изохорный процесс).

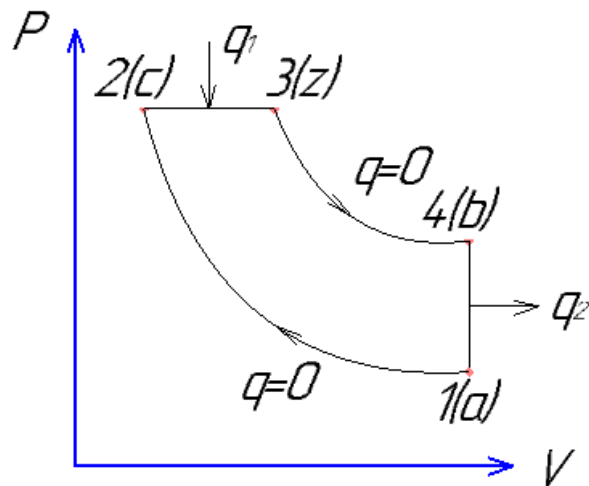


Рис. 2. - Цикл Дизеля (P=const при подводе тепла, V=const при отводе тепла)

- 1 – 2 (а–с) – процесс сжатия (адиабатный);
- 2 – 3 (с –z) – подвод тепла (изобарный процесс);
- 3 – 4 (z–b) – расширение (адиабатный процесс);
- 4 – 1 (b–a) – отвод тепла (изохорный процесс).

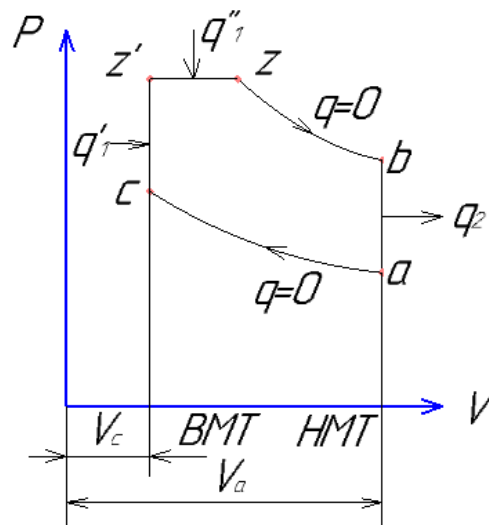


Рис. 3. - Цикл Сабатэ-Тринклера

$q_1 = q_1' + q_1''$  – подведенная теплота

$\eta_t = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1}$  – термический КПД

$q_1 - |q_2|$  – использованная теплота

Определим термический КПД смешанного цикла

$$q_1 = q_1' + q_1'' = c_v(T_{z'} - T_c) + c_p(T_z - T_{z'});$$

$$|q_2| = c_v(T_b - T_a);$$

$$\eta_t = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_b - T_a)}{c_v(T_{z'} - T_c) + c_p(T_z - T_{z'})}; \quad (1)$$

$$T_c = T_a \left( \frac{V_a}{V_c} \right)^{K-1} = T_a \cdot \varepsilon^{K-1}; \quad (2)$$

$$T_{z'} = T_c \frac{P_{z'}}{P_c} = T_c \cdot \lambda = T_a \cdot \varepsilon^{K-1} \cdot \lambda; \quad (3)$$

$$T_z = T_{z'} \frac{V_z}{V_{z'}} = T_{z'} \cdot \rho = T_a \cdot \varepsilon^{K-1} \cdot \lambda \cdot \rho; \quad (4)$$

$$T_b = T_z \cdot \left(\frac{V_z}{V_b}\right)^{K-1} = T_z \left(\frac{1}{\delta}\right)^{K-1} = T_a \cdot \varepsilon^{K-1} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{\delta}\right)^{K-1} = T_a \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{K-1} \cdot \lambda \cdot \rho \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия,  $\lambda$  – коэффициент остаточных газов,  $\rho$  – плотность воздуха.

Формулы (2) – (5) подставляем в формулу (1):

$$\begin{aligned} \eta_{t_{\text{смеси}}} &= 1 - \frac{T_a \left[ \lambda \cdot \rho \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{K-1} - 1 \right]}{\left[ T_a \cdot \varepsilon^{K-1} \cdot \lambda - T_a \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{K-1} \right] + K \left[ T_a \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \varepsilon^{K-1} - T_a \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{K-1} \right]} = \\ &= 1 - \frac{T_a \left[ \lambda \cdot \rho \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{K-1} - 1 \right]}{T_a \cdot \varepsilon^{K-1} [\lambda - 1 + K\lambda(\rho - 1)]} = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{K-1} - 1}{\varepsilon^{K-1} [\lambda - 1 + K\lambda(\rho - 1)]} = \\ &= 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^{K-1} \cdot \rho - 1}{\varepsilon^{K-1} [\lambda - 1 + K\lambda(\rho - 1)]} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{K-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^K - 1}{\lambda - 1 + K\lambda(\rho - 1)} \end{aligned}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{K-1}} \quad \text{– цикл Отто } (\rho = 1);$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{K-1}} \cdot \frac{\rho^K - 1}{K \cdot (\rho - 1)} \quad \text{– цикл Дизеля } (\lambda = 1)$$

Разделим числитель и знаменатель на  $C_v$  и введем обозначение  $K = \frac{C_p}{C_v}$ :

$$\eta_t = 1 - \frac{T_b - T_a}{T_z - T_c + K(T_z - T_z')} ;$$

$$p = \text{const} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} ;$$

$$V = \text{const} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} ;$$

$$PV = RT \quad \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} ;$$

Выразим  $T$  через  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} \quad \varepsilon = \frac{V_a \cdot V_z}{V_z \cdot V_c} = \delta \cdot \rho$$

$$\delta = \frac{V_a}{V_z} = \frac{V_b}{V_z} \quad \text{– степень последующего расширения;}$$

$$V_{z'} = V_c \quad \rho = \frac{V_z}{V_c} = \frac{T_z}{T_{z'}} \quad \rho = \frac{\varepsilon}{\delta} \quad \text{– степень предварительного расширения;}$$

$$\lambda = \frac{P_{z'}}{P_c} = \frac{T_{z'}}{T_c} \quad \text{– степень повышения давления.}$$

Выразим все  $T_x$  через  $T_a$ :

$$T_a \cdot V_a^{K-1} = T_c \cdot V_c^{K-1}$$

Сравним термодинамические циклы

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^{K-1} \cdot \rho - 1}{\varepsilon^{K-1} [\lambda - 1 + K\lambda(\rho - 1)]} \quad \text{– цикл Сабатэ–Тринклера} \quad (6)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{K-1}} \quad \text{– цикл Отто} (V_z = V_{z'}; \rho = 1) \quad (7)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{K-1}} \cdot \frac{\rho^K - 1}{K \cdot (\rho - 1)} \quad \text{– цикл Дизеля} (P_c = P_{z'}; \lambda = 1) \quad (8)$$

Как видно из формул 6,7,8 термический КПД  $\eta_t$  идеальных циклов с подводом теплоты при  $V=\text{const}$  зависит только от  $\varepsilon$  и показателя адиабаты  $K$ , а для смешанного цикла от величин  $\varepsilon$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  и  $K$ .

**Вывод:** при одном и том же значении  $\varepsilon$  более высокий КПД получается при  $V=\text{const}$  (цикл Отто). С увеличением  $\varepsilon$  термический КПД всех циклов возрастает. Повышение  $\varepsilon$  выгодно, но невозможно  $\varepsilon$  увеличивать до бесконечности, т.к. появляется детонация горючей смеси. Поэтому  $\eta_t$  бензиновых двигателей практически ниже чем у дизелей.

Для смешанного цикла при  $\varepsilon=\text{const}$   $\eta_t$  увеличивается с возрастанием  $\lambda$  и уменьшением  $\rho$ , но при этом увеличивается  $T_z$  и  $P_{z'}$ , т.е. увеличивается тепловая напряженность и нагрузка на основные детали двигателя, поэтому в современных быстроходных дизелях  $\lambda=1.4-2$ .

Практическая экономичность двигателя зависит от тех же основных факторов, что и теоретическая, т.е.  $\eta_t$ ,  $\varepsilon$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ .

### Литература

1. Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. 3 изд. М.: Высшая школа, 2007. 479 с.
  2. Сокол Н.А., Попов С.И. Основы конструкции и расчета автомобилей / Ростов-н/Д: Феникс, 2006. 303с.
  3. Шатров М.Г., Морозов К.А., Алексеев И.В. и др. Автомобильные двигатели. М.: Академия, 2010. 464с.
  4. Ковалевский В.И. Автомобильные двигатели. Краснодар: КубГТУ, 2003. 196с.
  5. Архангельский В.М., Вихерт М.М., Воинов А.Н. и др. Автомобильные двигатели. М.: Машиностроение, 1967. 496с.
  6. Артамонов М.Д., Иларионов В.А., Морин М.М. Основы теории и конструкции автомобиля. М.: Машиностроение, 1974. 288с.
  7. Павленко И.А. Улучшение экологических и экономических показателей двигателей внутреннего сгорания на основе применения индивидуальных приводов клапанов газораспределительного механизма // Инженерный вестник Дона, 2009, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/145](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/145).
  8. Морозов В.А., Морозова О.Н. Совершенствование эффективности и экологичности двигателей внутреннего сгорания // Инженерный вестник Дона, 2016, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503).
  9. Veitz V.L., Kochura A.E. Questions on the dynamics of an internal combustion engine assembly // Mechanism and Machine Theory, 1975. № 4 (10). pp. 279-289.
  10. Dovgyallo A.I., Kudinov V.A., Shestakova D.A. Working cycle analysis of the internal combustion engine with heat regeneration // 2017
-

International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. 2017. pp. 36-39.

### References

1. Lukanin V.N., Morozov K.A., Hachijan A.S. Dvigateli vnutrennego sgoranija [Internal combustion engine]. Vysshaja shkola, 2007. 479 p.
2. Sokol N.A., Popov S.I. Osnovy konstrukcii i rascheta avtomobilej [Basics of design and calculation of vehicles]. Feniks, 2006. 303p.
3. Shatrov M.G., Morozov K.A., Alekseev I.V. Avtomobil'nye dvigateli [Car engine] Akademija, 2010. 464p.
4. Kovalevskij V.I. Avtomobil'nye dvigateli [Car engine]. Krasnodar: KubGTU, 2003. 196p.
5. Arhangel'skij V.M., Vihert M.M., Voinov A.N. Avtomobil'nye dvigateli [Car engine]. Mashinostroenie, 1967. 496p.
6. Artamonov M.D., Ilarionov V.A., Morin M.M. Osnovy teorii i konstrukcii avtomobilja [Basic theory and design of the car] Mashinostroenie, 1974. 288p.
7. I.A. Pavlenko Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2009. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/145](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/145).
8. Morozov V.A., Morozova O.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503).
9. Veitz V.L., Kochura A.E. Mechanism and Machine Theory, 1975. № 4 (10). pp. 279-289.
10. Dovgyallo A.I., Kudinov V.A., Shestakova D.A. 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. 2017. pp. 36-39.