

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный аграрный университет»**

# ***Термодинамика***

***Тема: Двигатели внутреннего сгорания***

***Преподаватель: кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Энергообеспечение и автоматизация технологических  
процессов», Гусева Ольга Анатольевна***

# Типы тепловых двигателей:

- С внутренним подводом теплоты
  - Паровые
  - Стирлинга
  - Эриксона
- С внешним подводом теплоты
  - Поршневые
  - Газотурбинные
  - Реактивные
  - Ракетные

Термин «двигатель внутреннего сгорания» (ДВС) говорит о том, что процесс сгорания топлива происходит внутри цилиндра двигателя. Этот процесс подвода тепла посредством сгорания топлива непосредственно в цилиндре двигателя позволяет поднять верхнюю температуру цикла. Тем самым, при большем температурном перепаде, как следует из анализа прямого цикла Карно, увеличивается термический КПД цикла.

# Идеальные циклы ДВС

Рабочим телом в ДВС являются смесь воздуха с топливом и продукты сгорания топлива.

Преобразование тепловой энергии в механическую энергию в ДВС осуществляется посредством передачи работы расширения продуктов сгорания через поршень и кривошипно-шатунный механизм на коленчатый вал двигателя.

Они классифицируются по следующим признакам:

- 1) по способу осуществления рабочего цикла:
  - 4-тактные (последовательность явлений происходит в 4 хода поршня или 2 оборота вала);
  - 2-тактные (двигатели, у которых отсутствуют такты всасывания и выхлопа и рабочий процесс совершается за два хода поршня или одного оборота вала);
- 2) по способу воспламенения рабочей смеси:
  - с воспламенением топлива от сжатия рабочего тела (дизели без компрессорные и компрессорные);
  - с воспламенением топлива от искры (карбюраторные, газовые);
- 3) по роду топлива:
  - ДВС, работающие на газообразном топливе;
  - ДВС, работающие на жидком топливе;
- 4) по назначению:
  - стационарные;
  - передвижные;
  - автотракторные;
  - авиационные;
  - судовые;
  - для ж/д транспорта и т. д.;
- 5) по конструктивному исполнению:
  - с вертикальным расположением цилиндров;
  - с горизонтальным расположением цилиндров;
  - с расположением цилиндров под углом.

## *Основные допущения, принимаемые при рассмотрении термодинамических циклов ДВС*

- 1. Рабочее тело обладает свойствами идеального газа.**
- 2. Сжатие и расширение рабочего тела протекают без теплообмена между рабочим телом и окружающей средой.**
- 3. Химический состав рабочего тела остается неизменным в течение всего цикла. Этим допущением исключается из рассмотрения процесс сгорания, который условно заменяется процессом подвода теплоты к рабочему телу от «источника теплоты».**
- 4. Цикл протекает с неизменным количеством рабочего тела. Этим допущением исключаются из рассмотрения процессы впуска и выпуска, причем последний условно заменяется процессом отвода теплоты от рабочего тела к «приемнику теплоты».**
- 5. Отсутствуют гидравлические и механические потери в узлах и механизмах двигателя.**

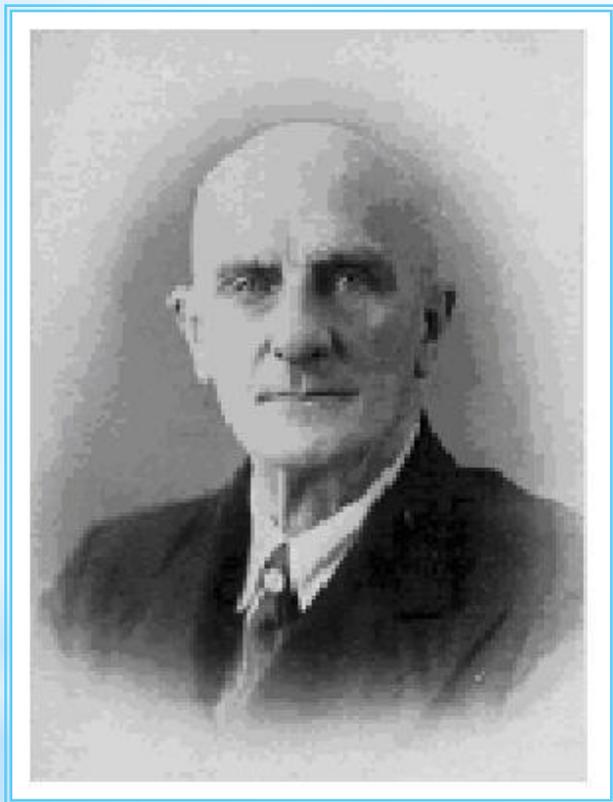
## *Основные циклы ДВС:*

- ❖ со смешанным подводом теплоты при постоянном объеме и давлении (комбинированный цикл, цикл Тринклера-Сабатэ) – отражает процесс дизеля без компрессора, который наиболее близок к реальным условиям сгорания топлива;
- ❖ с подводом теплоты при постоянном давлении (цикл Дизеля) – отражает процесс тихоходного дизеля;
- ❖ с подводом теплоты при постоянном объеме (цикл Отто) – отражает процесс двигателя быстрого сгорания (карбюраторного и газового).

Теоретические циклы, давая максимально возможное превращение теплоты в работу при приведенных выше условиях, схематизируют действительные явления и позволяют изучать эти явления, отмечая главные факторы, которые влияют на экономику этих явлений.

## *Бескомпрессорные дизели*

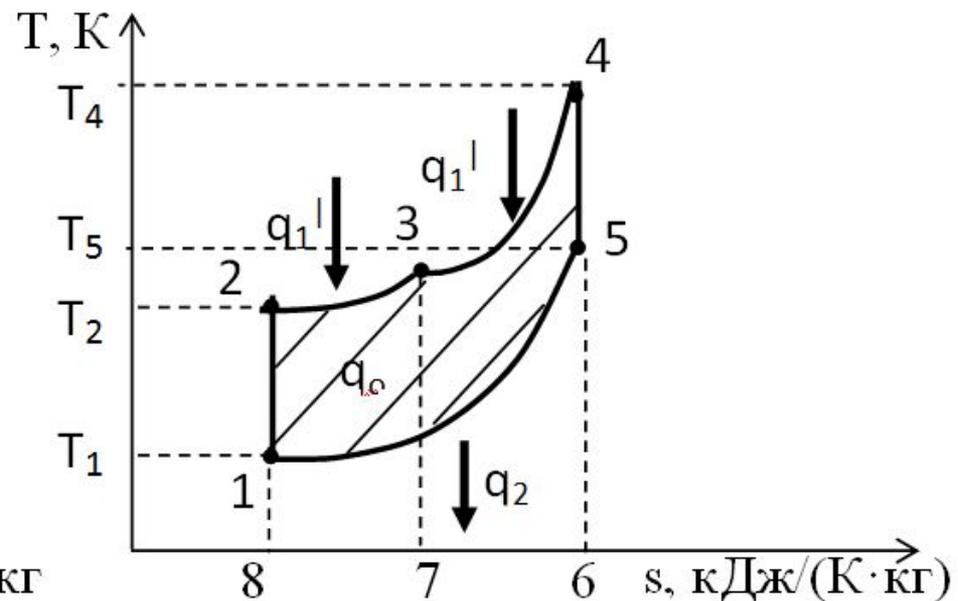
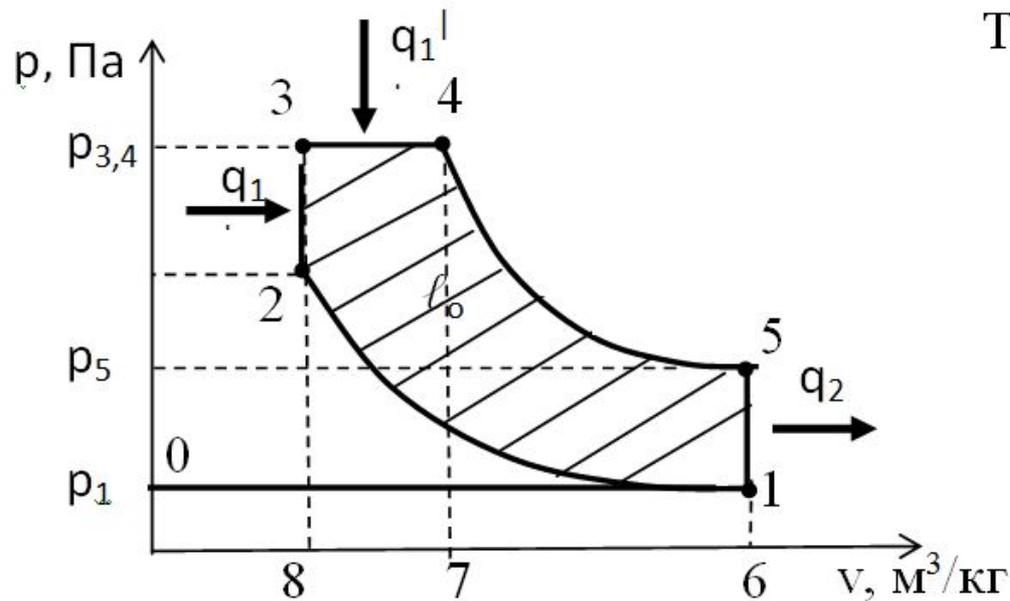
*Цикл со смешанным (комбинированным)  
подводом теплоты*



**Густав Васильевич  
Тринклер  
(1876-1857 гг.)**

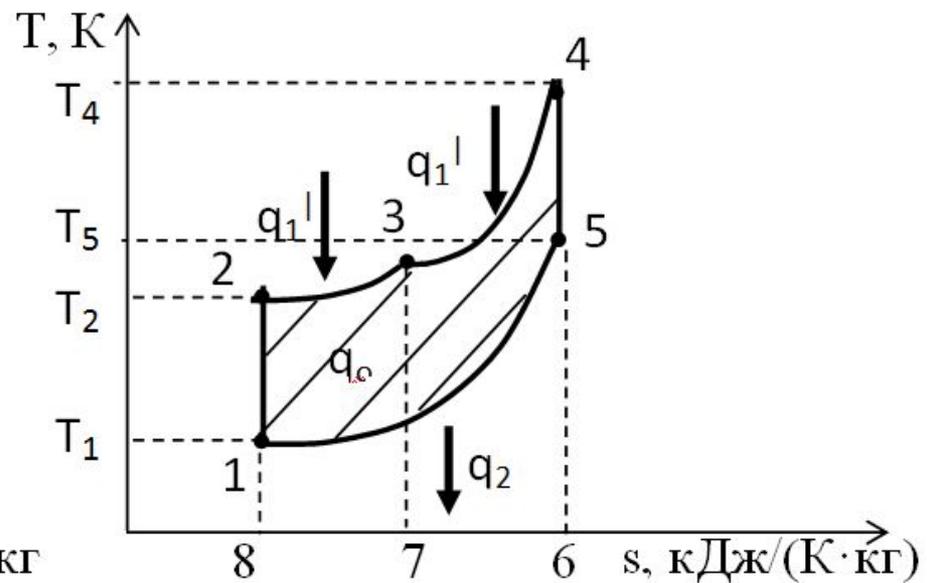
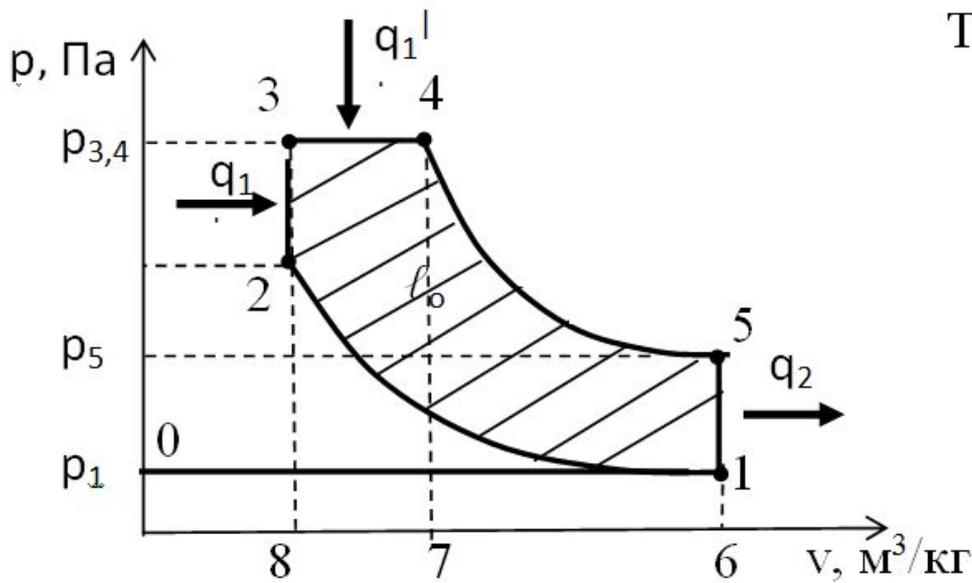


**Яков Васильевич  
Мамин  
(1873-1955 гг.)**



В этом виде цикла в процессе 1-2 происходит адиабатное сжатие рабочего тела, после чего подводится теплота сначала при  $v = \text{const}$  (линия 2-3), а затем при  $p = \text{const}$  (линия 3-4). Далее происходит адиабатное расширение (линия 4-5) и, наконец, отвод теплоты при  $v = \text{const}$  (линия 5-1).

Процессы всасывания (линия 0-1) и выхлопа (линия 1-0) в термодинамике не рассматриваются, так как это механические процессы.



### Характеристики цикла:

Степень сжатия

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

Степень повышения давления при сгорании топлива

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

Степень предварительного расширения при  $p = \text{const}$

$$\rho = \frac{v_4}{v_3}$$

# Термический КПД цикла

Термический КПД цикла (см. прямой цикл Карно –  $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$ )

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1^| + q_1^||};$$

$$q_1^| = c_v(T_3 - T_2), \quad q_1^|| = c_p(T_4 - T_3) \quad \text{и} \quad q_2 = c_v(T_5 - T_1);$$

Термический КПД:

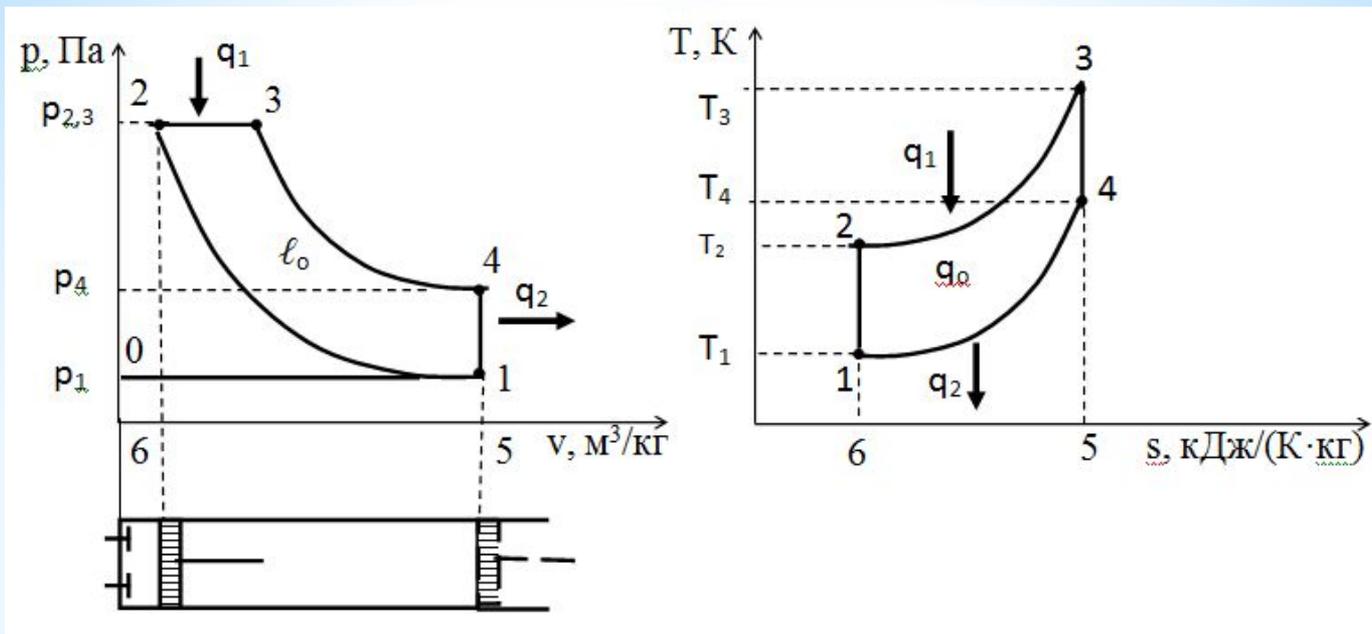
$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}$$

## *Компрессорные дизели*

### *Цикл с подводом теплоты при постоянном давлении*

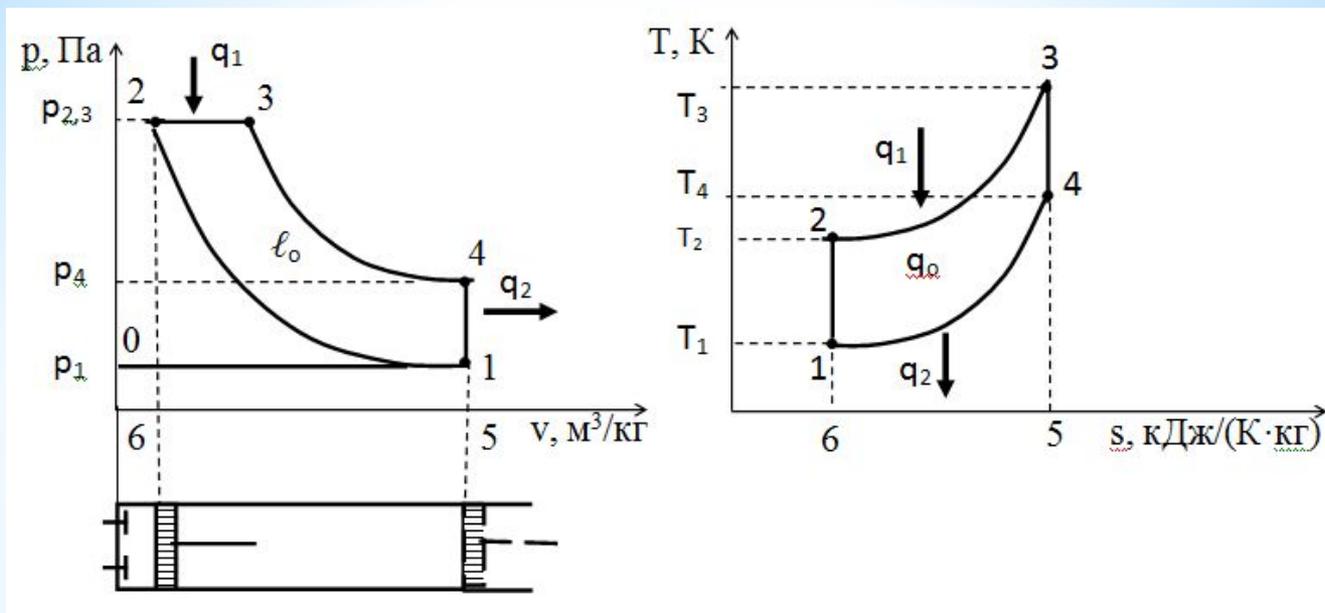
В таких двигателях топливо распыляется сжатым воздухом. Если сжимать один воздух, а топливо вводить в цилиндр после сжатия, то степень сжатия может быть значительно большей. Такая схема применяется в дизель-моторах, и была предложена инженером Дизелем в 1897 г.



В цикле с подводом тепла при  $p = \text{const}$  первоначальное состояние рабочего тела в  $p$ - $v$ -координатах характеризуется точкой 1.

В течение первого хода справа налево совершается сжатие воздуха, которое происходит без теплообмена с внешней средой (линия 1-2). На участке 2-3 к рабочему телу подводится тепло  $q_1$  таким образом, что давление при этом остается постоянным (так как увеличивается объем), что приблизительно соответствует реальным условиям сгорания трудно сгораемого топлива.

Дальнейшее расширение рабочего тела (линия 3-4) происходит без теплообмена с внешней средой (по адиабате). Для приведения рабочего тела в первоначальное состояние 1, от него отводится тепло  $q_2$  при  $v = \text{const}$  (линия 4-1). Теоретический цикл – (1-2-3-4). Процессами 0-1 (процесс всасывания) и 1-0 (процесс выхлопа) – пренебрегают, считая, что в цилиндре находится постоянное количество газа (механические процессы).



### Характеристики цикла:

Степень сжатия

Степень повышения давления  
при сгорании топлива

Степень предварительного  
расширения при  $p = \text{const}$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2} = 1$$

$$\rho = \frac{V_3}{V_2}$$

# Термический КПД цикла

Тогда подставив в уравнение  $\lambda = 1$  в  $\eta_t$  цикла с комбинированным подводом теплоты получим:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}.$$

Выводы:

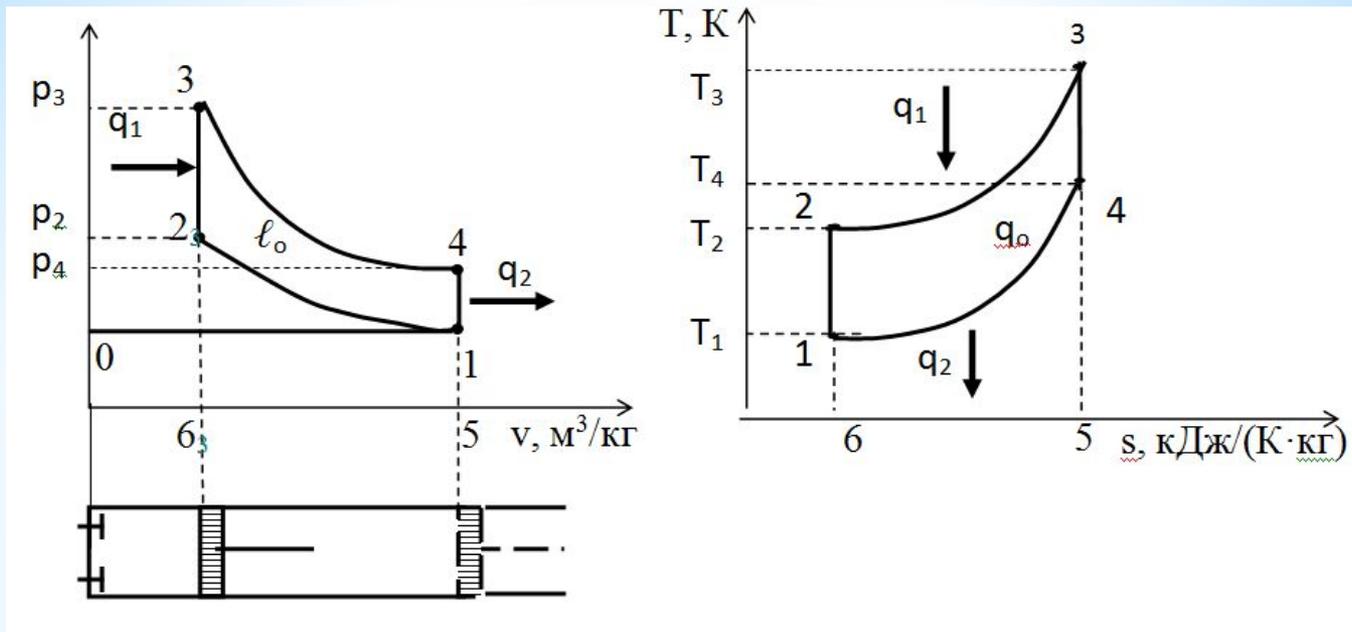
1. термический КПД двигателя Дизеля зависит от степени предварительного расширения  $\rho$  и с увеличением  $\rho$  уменьшается экономичность цикла;
2. с увеличением степени сжатия  $\varepsilon$  увеличивается термический КПД цикла.

*Двигатели с искровым зажиганием*  
*Цикл с подводом теплоты при постоянном  
объеме*

К ДАННОМУ ТИПУ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТНОСЯТСЯ  
ДВИГАТЕЛИ С ВНЕШНИМ  
СМЕСООБРАЗОВАНИЕМ



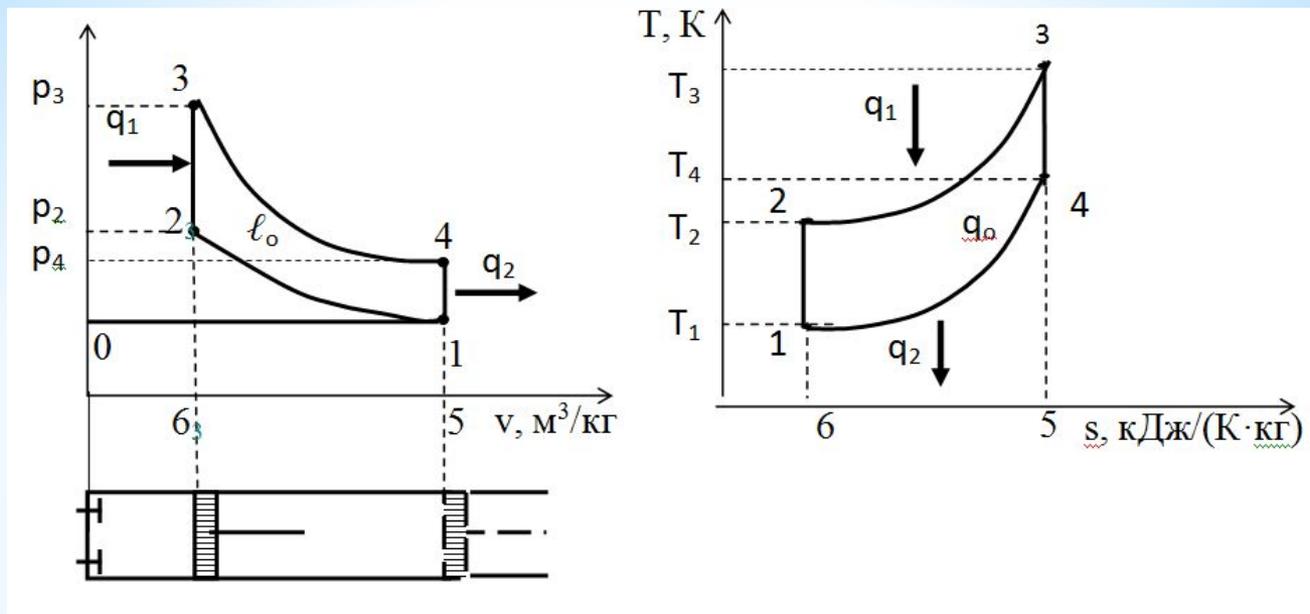
**Николаус Август Отто**  
(1832-1891 гг.)



Цикл с подводом тепла при  $v = \text{const}$  начинается от состояния рабочего тела в  $p_v$  и  $T_s$ -координатах (рисунок 3), характеризующего точкой 1, сжатием рабочего тела, которое происходит при движении поршня справа налево (сверху вниз) до точки 2 этот процесс происходит без теплообмена с внешней средой, то есть по адиабате. Затем осуществляется подвод теплоты при постоянном объеме – по изохоре 2-3, что приблизительно соответствует условию подвода тепла при сгорании горючей смеси в реальных двигателях, использующих легкоиспаряющееся топливо.

От состояния, характеризуемое точкой 3, начнется процесс расширения рабочего тела при отсутствии теплообмена с окружающей средой, то есть по адиабате 3-4. Поршень при этом придет в первоначальное положение. Для того, чтобы рабочее тело пришло в первоначальное состояние, от него отводится теплота (процесс 4-1).

Процессы всасывания и выхлопа в термодинамическое не рассматриваются.



### Характеристики цикла:

Степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

Степень повышения давления  
при сгорании топлива

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

Степень предварительного  
расширения при  $p = \text{const}$

$$\rho = 1$$

# Термический КПД цикла

Подставив в уравнение  $\rho = 1$  получим:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda 1^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(1-1)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda - 1}$$
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Выводы:

- термический КПД двигателя Отто не зависит от нагрузки, так как в формулу (15) не входит степень повышения давления « $\lambda$ » при сгорании топлива;
- с увеличением степени сжатия « $\varepsilon$ » теплота в цикле используется более совершенно, но в двигателях быстрого сгорания этому увеличению есть предел – температура самовоспламенения горючего, так как может случиться преждевременная вспышка.

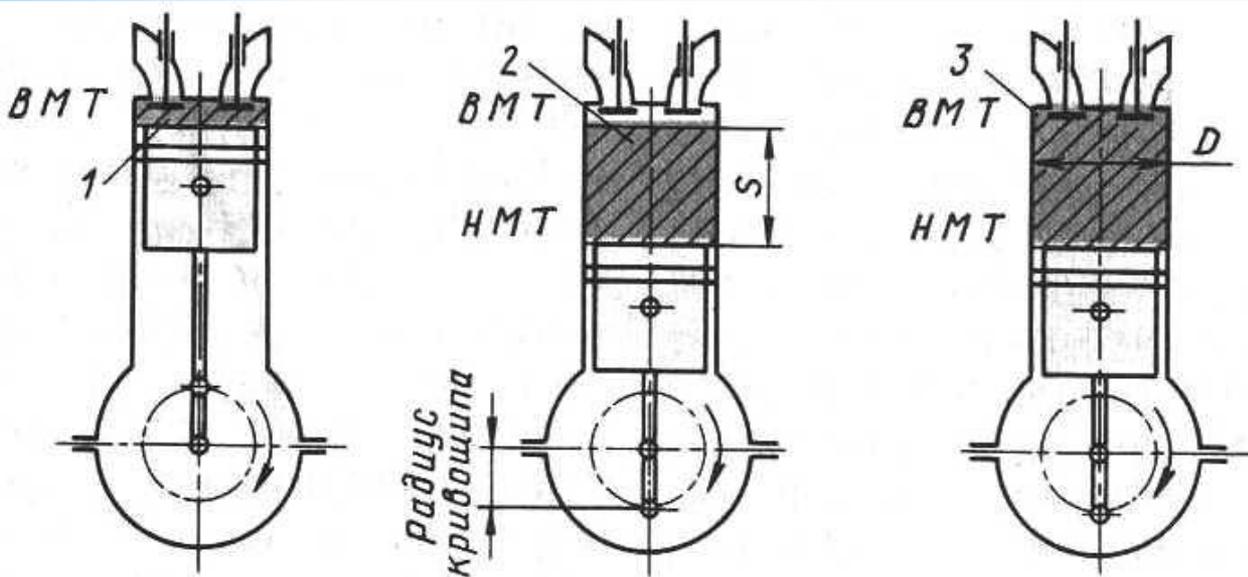
# Сравнительная оценка энергетических характеристик циклов ДВС

При одинаковых степенях сжатия цикл Отто – экономичнее цикла Дизеля, так как  $\eta_{t \text{ Отто}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$ ;  $\eta_{t \text{ Дизель}} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} k(\rho - 1)}$ , причем при обычных значениях  $\rho$  и  $k$ :  $\frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)} > 1$  и, следовательно,  $\eta_{t \text{ Отто}} > \eta_{t \text{ Дизель}}$ , так как в цикле Дизеля принимаются более высокие степени сжатия.

Сравнивая все три вида циклов при одинаковой степени сжатия ( $\varepsilon_v = \varepsilon_{vp} = \varepsilon_p$ ) их термодинамические КПД находятся в следующем соотношении:  $\eta_{tv} > \eta_{tvp} > \eta_{tp}$ . Однако, учитывая то обстоятельство, что все виды циклов в реальных двигателях работают при разных степенях сжатия ( $\varepsilon_v = 6 \dots 10$ ;  $\varepsilon_{vp} = 14 \dots 16$ ), то сравнивать термодинамические КПД следует не при одинаковых степенях сжатия  $\varepsilon$ , а при одинаковых условиях их осуществления, то есть при одинаковых максимальных давлениях и температурах. В этих условиях  $\eta_{tp} > \eta_{tvp} > \eta_{tv}$ .

# Рабочие циклы поршневых ДВС

*Рабочим (действительным) циклом* двигателя называют совокупность повторяющихся во внутрицилиндровом пространстве тепловых, химических и газодинамических процессов, в результате которых *термохимическая энергия топлива* преобразуется в *механическую работу*.



*1 - объем камеры сгорания;*  
*2 - рабочий объем цилиндра;*  
*3 - полный объем цилиндра;*  
*S - ход поршня;*  
*D - диаметр цилиндра*

**Мертвая точка поршня** – положение поршня в момент, когда изменяется направление его движения (скорость поршня равна нулю);

**Верхняя мертвая точка (ВМТ)** – максимальное удаление поршня от оси вращения коленчатого вала.

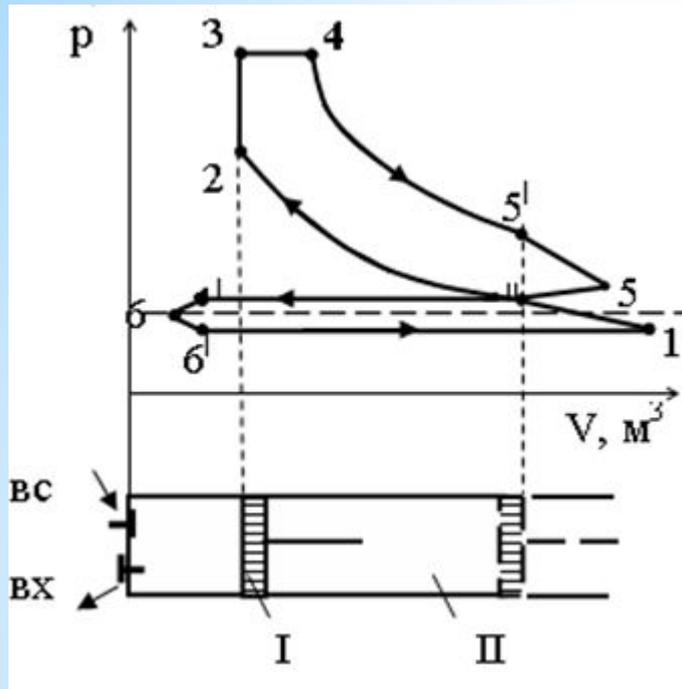
**Нижняя мертвая точка (НМТ)** – минимальное удаление поршня от оси вращения коленчатого вала.

***Индикаторная диаграмма*** – это графическая зависимость давления газов в цилиндре от положения поршня (т.е. от изменения объема рабочего тела) или от угла поворота коленчатого вала

***Свернутая индикаторная диаграмма*** – графическая зависимость давления газов в цилиндре от положения поршня (т.е. от изменения объема рабочего тела)

***Развернутая индикаторная диаграмма*** – графическая зависимость давления газов в цилиндре от угла поворота коленчатого вала

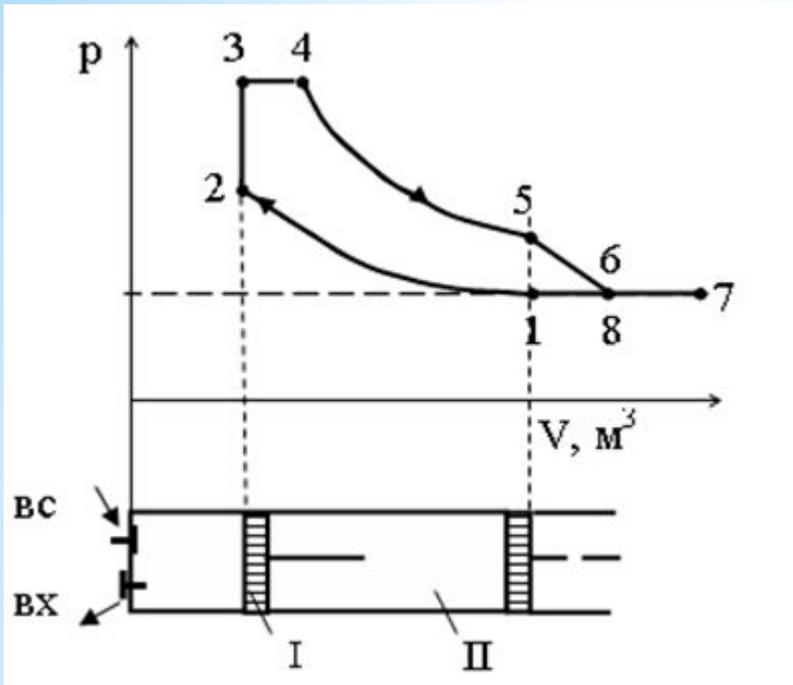
- \* Рабочий процесс реального двигателя внутреннего сгорания принципиально отличается от теоретического цикла идеального двигателя.
- \* Идеальный цикл - замкнутый круговой процесс, составленный из отдельных термодинамических процессов.
- \* Рабочий цикл не замкнут - после совершения работы, в результате расширения, рабочее тело удаляется из двигателя, а на его место поступает свежая порция горючей смеси. Процессы всасывания и выхлопа рабочего тела не являются термодинамическими процессами.
- \* В реальном двигателе рабочий процесс теплового двигателя - совокупность отдельных процессов, протекающих последовательно за два или один полный оборот коленчатого вала.



I – поршень; II – цилиндр

Индикаторная диаграмма четырехтактного карбюраторного двигателя

- \* Четырехтактный двигатель. Первый такт (впуска) поршень вблизи к ЛМТ (точка 1<sup>1</sup>). Камера сгорания заполнена продуктами сгорания. При перемещении поршня к ПМТ (точки 6-6<sup>1</sup>-1) распределительный механизм открывает впускные клапаны. Предпоршневое пространство сообщается с выпускной системой, цилиндр заполняется свежим зарядом (воздухом или горючей смесью). Вследствие сопротивления впускной системы давление в цилиндре в конце впуска меньше, чем на выпуске (точка 1).
  - \* Второй такт сжатия поступившего свежего заряда (процесс 1-2) происходит при перемещении поршня к ЛМТ. Давление и температура в цилиндре при этом повышаются, при некотором перемещении поршня от ПМТ давление в цилиндре, и становится равным с давлением в точке 1<sup>1</sup>. До этого момента впускные клапаны остаются открытыми (запаздывание закрытия клапанов) - для улучшения наполнения цилиндра свежим зарядом.
  - \* После закрытия клапанов при дальнейшем перемещении поршня к ЛМТ давление и температура при сжатии повышаются (процесс 2-3) и зависят от степени сжатия, герметичности рабочей полости, теплоотдачи в стенки, а также от значения давления и температуры в точке 1 (в начале сжатия).
- Третий такт - сгорание и расширение (процессы 2-3 и 3-4), то есть при ходе поршня от ЛМТ к ПМТ. Происходит интенсивное сгорание топлива и выделение теплоты, вследствие чего давление и температура в цилиндре резко повышается с некоторым увеличением внутрицилиндрового объема. Под действием давления происходит перемещение поршня к ПМТ и расширение газов (процесс 4-5<sup>1</sup>-5). При расширении газы совершают полезную работу, поэтому этот такт называется рабочим ходом.
- \* Во время четвертого такта - такта выпуска осуществляется очистка цилиндра от продуктов сгорания (процесс 5-1<sup>1</sup>-6<sup>1</sup>-6). Поршень перемещается от ПМТ к ЛМТ и вытесняет газы через открытые выпускные клапаны, которые открываются несколько раньше, чем поршень достигнет положения ЛМТ - для улучшения выпуска продуктов сгорания.



I – поршень; II – цилиндр

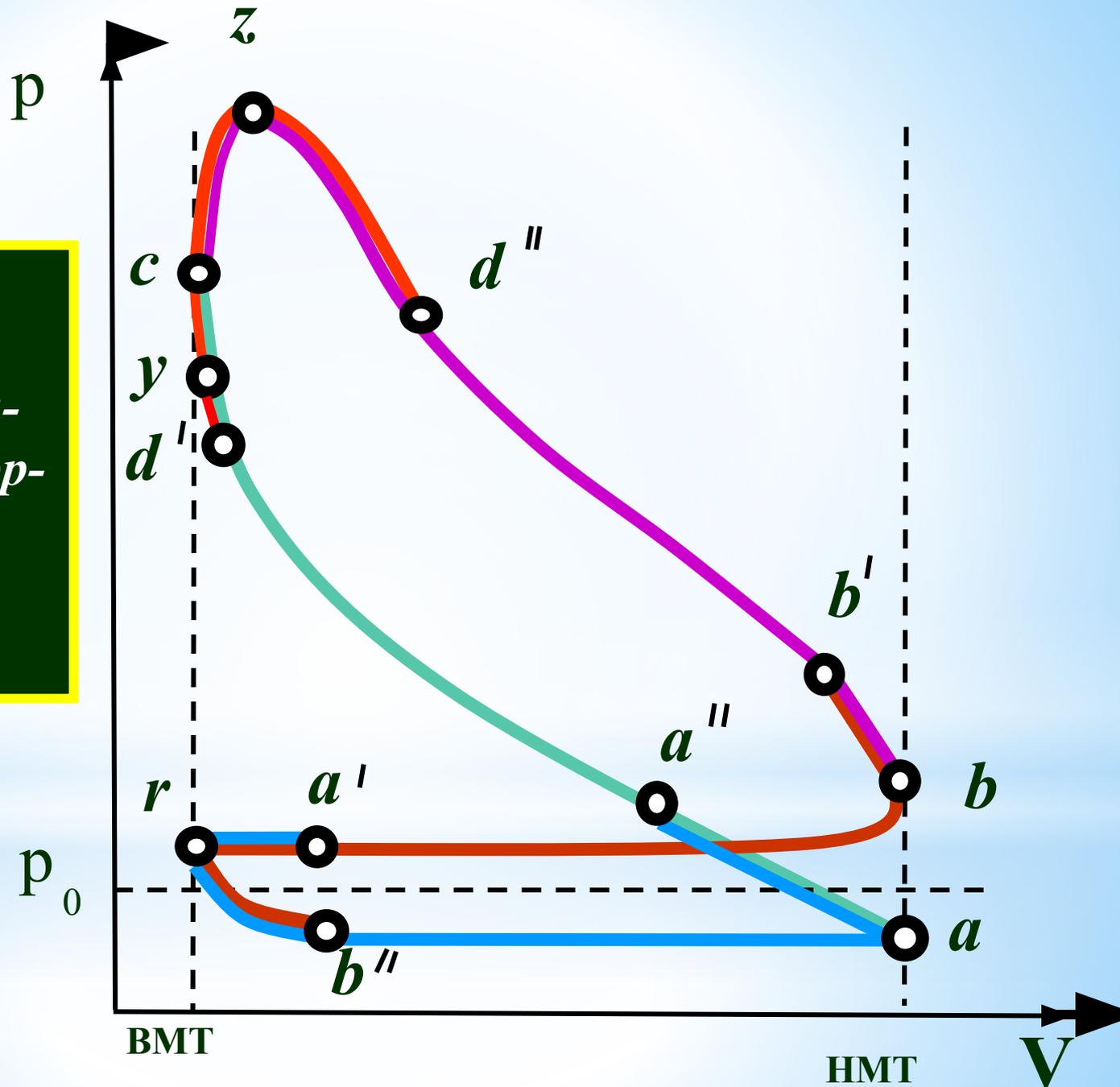
Индикаторная диаграмма двухтактного карбюраторного двигателя

\* Двухтактный двигатель. Цикл совершается за один оборот коленчатого вала, то есть в два раза чаще, чем в четырехтактном двигателе при одинаковой частоте вращения вала. Это объясняется тем, что очистка цилиндра в нем от продуктов сгорания и заполнение его свежим зарядом происходит только при движении поршня вблизи ПМТ. Очистка цилиндра осуществляется предварительно сжатым воздухом до определенного давления или горючей смесью. Предварительное сжатие происходит в специальном компрессоре или в небольших двигателях используется внутренняя полость картера (кривошипная камера) и поршень двигателя.

\* Первый такт соответствует ходу поршня от ЛМТ к ПМТ. В цилиндре только что произошло сгорание топлива (процесс 2-3 и 3-4) и начался процесс 4-5 расширения газов – рабочий ход. Выпускные клапаны открываются несколько раньше момента прихода поршня к выпускным окнам, и продукты сгорания вытекают из цилиндра в выпускной патрубок. Давление в цилиндре резко падает (процесс 5-6). Когда давление становится примерно равным в ресивере или немного ниже его, поршень открывает впускные окна. Воздух, предварительно сжатый, поступает через впускные окна в цилиндр, вытесняя из него продукты сгорания, и вместе с ними попадает в выпускной патрубок (процесс 6-7).

\* Второй такт соответствует ходу поршня от ПМТ к ЛМТ (процесс 8-1-2). В начале хода поршня продолжается процесс газообмена. Его конец (точка 1) определяется моментом закрытия впускных окон и выпускных клапанов. С момента окончания процесса газообмена начинается сжатие воздуха. При движении поршня вблизи ЛМТ (точка 2) в цилиндр через форсунку подается топливо. Подача заканчивается во время процесса сгорания топлива.

*Свернутая  
индикаторная  
диаграмма четы-  
рехтактного пор-  
шневого ДВС с  
искровым  
зажиганием*



*Развернутая индикаторная диаграмма четырехтактного поршневого ДВС с искровым зажиганием*

