

### План лекции:

1. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Цикл Отто.
2. Цикл Дизеля
3. Цикл Тринклера
4. Вопросы для дистанционного освоения лекции

## 1. ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ. ЦИКЛ ОТТО.

**Двигатель внутреннего сгорания** представляет собой тепловую машину, в которой подвод теплоты к рабочему телу осуществляется за счет сжигания топлива внутри самого двигателя. Рабочим телом в таких двигателях является на первом этапе воздух или смесь воздуха с легко воспламеняющимся топливом, а на втором этапе - продукты сгорания этого жидкого или газообразного топлива (бензин, керосин, соляровое масло и др.).

В таких двигателях давления и температуры рабочего тела не слишком высоки, что позволяет с хорошим приближением рассматривать рабочее тело как идеальный газ.

Двигатели внутреннего сгорания обладают двумя существенными преимуществами по сравнению с другими типами тепловых двигателей.

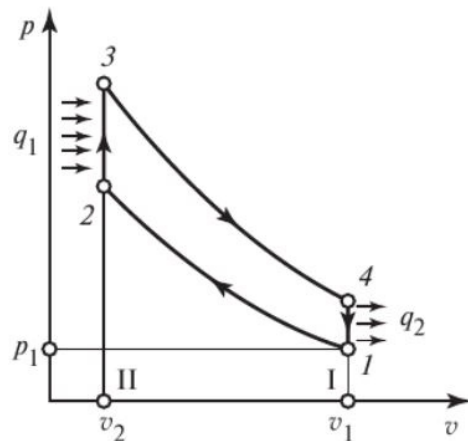
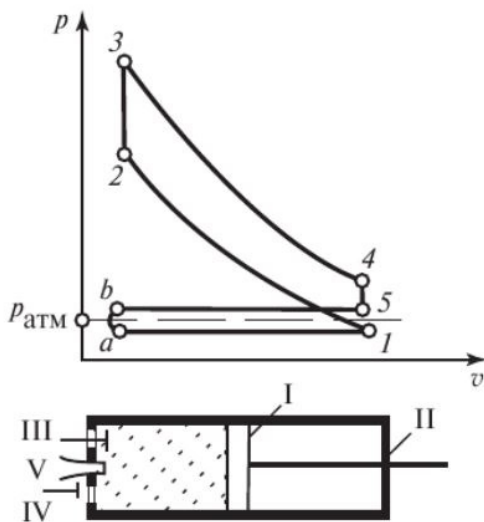
Во-первых, благодаря тому что горячий источник теплоты находится внутри самого двигателя, отпадает необходимость в больших теплообменных поверхностях, через которые осуществляется подвод теплоты от горячего источника к рабочему телу. Это приводит к большей компактности двигателей внутреннего сгорания, например, по сравнению с паросиловыми установками.

Во-вторых, в тех тепловых двигателях, в которых подвод теплоты к рабочему телу осуществляется от внешнего горячего источника, верхний предел температуры рабочего тела в цикле ограничивается температурой, допустимой для конструкционных материалов (так, повышение температуры водяного пара в паротурбинных установках лимитируется свойствами сталей, из которых изготавливаются элементы парового котла и паровой турбины; с ростом температуры, как известно, снижается предел прочности материала). В двигателях же внутреннего сгорания предельное значение непрерывно меняющейся температуры рабочего тела, получающего теплоту не через стенки двигателя, а за счет тепловыделения в объеме самого рабочего тела, может существенно превосходить этот предел. При этом надо еще иметь в виду, что стенки цилиндра и головки блока цилиндров имеют принудительное охлаждение, что позволяет расширить температурные границы цикла и тем самым увеличить его термический КПД.

Основным элементом любого поршневого двигателя является цилиндр с поршнем, соединенным посредством кривошипно-шатунного механизма с внешним потребителем работы. Цилиндр снабжен двумя отверстиями с клапанами, через одно из которых осуществляется всасывание рабочего тела (воздуха или горючей смеси), а через другое — выброс рабочего тела по завершении цикла.

Различают три основных вида циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания: **цикл Отто** (сгорание при  $v = \text{const}$ ), **цикл Дизеля** (сгорание при  $p = \text{const}$ ) и **цикл Тринклера** (сгорание при  $v = \text{const}$  и затем при  $p = \text{const}$ ).

Рассмотрим **цикл Отто**, названный так по имени немецкого конструктора Н.А. Отто, осуществившего этот цикл в 1876 году.



Поршень I совершает возвратно-поступательное движение в цилиндре II, снабженном всасывающим III и выхлопным IV клапанами. В процессе a-1 поршень движется слева направо, в цилиндре создается разрежение, открывается всасывающий клапан III и в цилиндр подается горючая смесь, приготовленная в специальном устройстве - карбюраторе. Горючей смесью в цикле Отто является воздух, смешанный с некоторым количеством паров бензина (или другого горючего). После того как поршень дойдет до крайнего правого положения, процесс заполнения цилиндра горючей смесью заканчивается и всасывающий клапан закрывается, поршень начинает двигаться в обратном направлении - справа налево. При этом горючая смесь в цилиндре сжимается и её давление возрастает (процесс 1-2). После того как давление смеси в цилиндре достигает определенного значения, соответствующего точке 2 на индикаторной диаграмме, с помощью электрической свечи V производится поджигание горючей смеси. Процесс сгорания смеси происходит практически мгновенно, поршень не успевает переместиться, и поэтому процесс сгорания можно считать изохорным. В процессе сгорания выделяется теплота, за счёт которой рабочее тело, находящееся в цилиндре, нагревается и его давление повышается до значения, соответствующего точке 3 на индикаторной диаграмме. Под действием этого давления поршень вновь перемещается вправо, совершая при этом работу расширения, отдаваемую внешнему потребителю. После того как поршень дойдет до правой мёртвой точки, с помощью специального устройства открывается выхлопной клапан IV и давление в цилиндре снижается до значения, несколько превышающего атмосферное (процесс 4-5); при этом часть газа выходит из цилиндра. Затем поршень вновь движется влево, выталкивая из цилиндра в атмосферу оставшуюся часть отработавших газов. После этого начинается новый цикл.

Таким образом, поршень в цилиндре двигателя, работающего по циклу Отто, в течение одного цикла **совершает четыре хода (такта)** - всасывание, сжатие, расширение после сгорания смеси, выталкивание продуктов сгорания в атмосферу.

**Термодинамический анализ цикла Отто** удобно проводить, рассматривая идеализированный цикл, соответствующий рассмотренной индикаторной диаграмме. Поскольку в горючей смеси, подаваемой в цилиндр двигателя, количество топлива невелико, для удобства анализа можно считать, что рабочим телом цикла является воздух. Количество воздуха в двигателе остается неизменным, а подвод теплоты к рабочему телу осуществляется от внешнего горячего источника через стенку цилиндра в изохорном процессе 2-3 и соответственно отвод теплоты от рабочего тела к холодному источнику - в изохорном процессе 4-1.

**Реальный цикл** двигателя внутреннего сгорания - это разомкнутый цикл, рабочее тело засасывается извне и по окончании цикла выбрасывается в атмосферу; таким образом, в каждом цикле участвует новая порция рабочего тела. В отношении термодинамического анализа рассмотренный замкнутый цикл не отличается от разомкнутого цикла Отто.

Поскольку процессы сжатия (1-2) и расширения (3-4) в этом цикле происходят за весьма короткие промежутки времени, в течение которых не успевают произойти заметного теплообмена с окружающей средой, с хорошим приближением эти процессы можно считать адиабатными.

Таким образом, идеализированный замкнутый цикл, термодинамически эквивалентный циклу Отто, состоит из двух адиабат (адиабата сжатия 1-2 и адиабата расширения 3-4) и двух изохор (изохора подвода теплоты 2-3 и изохора отвода теплоты 4-1). Работа, производимая двигателем за один цикл, изображается площадью 2-3-4-1-2.

### Определим термический КПД цикла Отто.

Теплота, подводимая к рабочему телу в изохорном процессе 2-3, определяется уравнением:

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) > 0, \quad (1)$$

где  $T_2$  и  $T_3$  - температуры рабочего тела соответственно до подвода теплоты и после него, а  $c_v$  - средняя теплоемкость рабочего тела в рассматриваемом интервале температур.

Количество теплоты, отводимой от рабочего тела в изохорном процессе 4-1, составляет:

$$q_2 = c_v (T_1 - T_4) < 0. \quad (2)$$

где  $T_4$  и  $T_1$  - температуры рабочего тела до отвода теплоты и после него.

В соответствии с общим определением  $\eta_T = 1 - |q_2|/|q_1|$ , отсюда **термический КПД цикла Отто** может быть выражен уравнением:

$$\eta_T = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_v (T_3 - T_2)}. \quad (3)$$

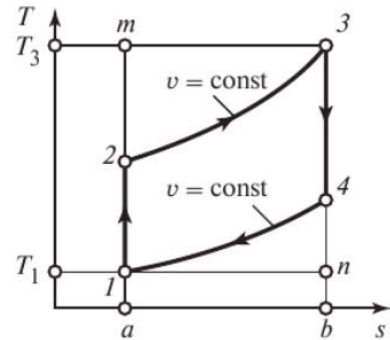
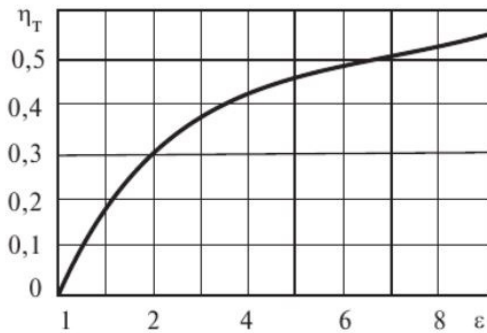
При  $c_v = \text{const}$  выражение (3) может быть приведено к следующему виду:

$$\eta_T = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) T_2}. \quad (4)$$

Из основного свойства адиабатного процесса  $pv^k = \text{const}$  и уравнения состояния идеального газа можно показать, что  $T_4/T_1 = T_3/T_2$ , а  $T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1}$ . Величина  $\boxed{\varepsilon = v_1/v_2}$  носит название **степени сжатия**. Тогда для термического КПД цикла Отто имеем:

$$\boxed{\eta_T = 1 - \varepsilon^{1-k}}. \quad (5)$$

Зависимость  $\eta_T$  цикла Отто от  $\epsilon$  для  $k = 1.4$  представлен на рисунке. По уравнению (5) термический КПД цикла Отто зависит только от степени сжатия рабочего тела в адиабатном процессе 1-2, причем чем больше степень сжатия  $\epsilon$ , тем выше термический КПД цикла.



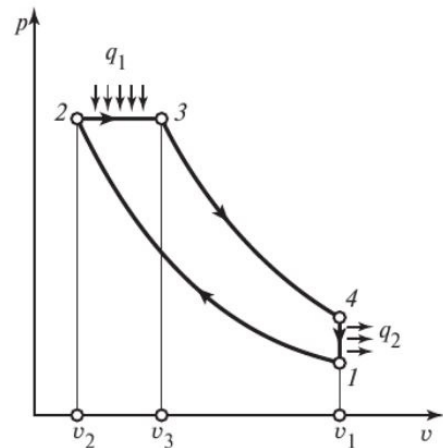
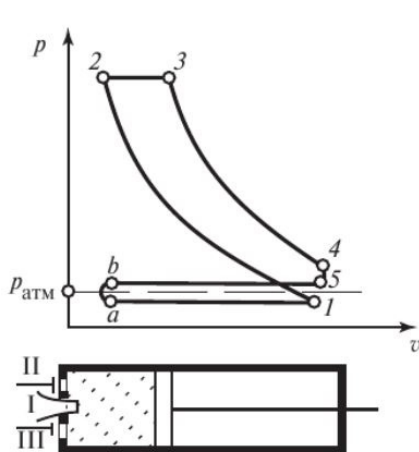
Вывод о том, что благодаря применению предварительного сжатия рабочего газа возрастает термический КПД двигателя, весьма важен; в дальнейшем будет показано, что этот вывод справедлив для любых двигателей внутреннего сгорания.

Итак, для увеличения КПД выгодно всячески увеличивать степень сжатия. Однако практически осуществить сжатие до слишком высоких значений  $\epsilon$ , сопровождающееся значительным повышением температуры и давления, не удастся по той причине, что по достижении определенного значения  $\epsilon$  часто еще до прихода поршня в левое крайнее положение происходит самовоспламенение горючей смеси; как правило, этот процесс носит детонационный характер и разрушает элементы двигателя. Поэтому степень сжатия в обычных карбюраторных двигателях не превышает 7-12. **Степень сжатия зависит от качества топлива, повышаясь с улучшением его антидетонационных свойств, характеризуемых октановым числом.**

Карбюраторные двигатели, работающие по циклу Отто, широко распространены в технике: они применяются в легковых и многих грузовых автомашинах, на самолетах (с поршневыми двигателями).

## 2. ЦИКЛ ДИЗЕЛЯ

Степень сжатия  $\epsilon$  в цикле может быть повышена, если сжимать не горючую смесь, а чистый воздух, и затем после окончания процесса сжатия вводить в цилиндр горючее. Именно на этом принципе основан **цикл Дизеля**, названный по имени немецкого инженера Р. Дизеля, построившего в 1897 году двигатель, работавший по этому циклу.



В процессе a-1 в цилиндр двигателя засасывается чистый атмосферный воздух; в процессе 1-2 осуществляется адиабатное сжатие этого воздуха до давления  $p_2$  (степень сжатия в двигателях с циклом Дизеля обычно достигает  $\epsilon = 15-16$ ). Затем начинается процесс расширения воздуха и одновременно через специальную форсунку впрыскивается топливо (керосин, соляровое масло). За счет высокой температуры сжатого воздуха топливо воспламеняется и сгорает при постоянном давлении, что обеспечивается расширением газа от  $v_2$  к  $v_3$  при  $p = \text{const}$ . Поэтому цикл Дизеля называют циклом со сгоранием 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 (по изохоре 4-5) и газ выталкивается из цилиндра в атмосферу (линия 5-b); таким образом, **цикл Дизеля - это четырехтактный цикл.**

Для удобства анализа заменяем рассмотренный цикл Дизеля термодинамически эквивалентным ему идеализированным замкнутым циклом, осуществляемым с чистым воздухом. Как видно из этой диаграммы, идеализированный цикл Дизеля состоит из двух адиабат (адиабаты сжатия 1-2 и адиабаты расширения 3-4), изобары 2-3, по которой осуществляется подвод тепла от горячего источника, и изохоры 4-1, по которой осуществляется отвод теплоты к холодному источнику.

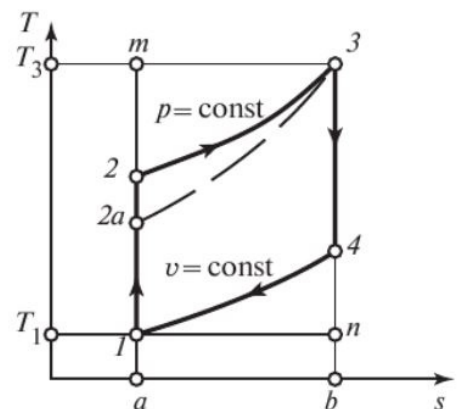
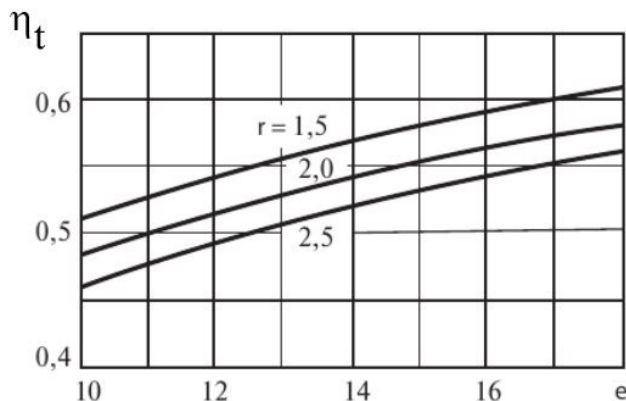
**Вычислим термический КПД цикла Дизеля:**

$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{|q_1|} = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{k} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) T_2}. \quad (6)$$

С учётом того, что  $v_1 = v_4$ ,  $p_2 = p_3$ , используя основное свойство адиабаты  $pv^k = \text{const}$ , уравнение состояния идеального газа, и вводя понятие степени предварительного расширения  $\rho = v_3/v_2$ , можно получить:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{k} \frac{\rho^k - 1}{\rho - 1} \epsilon^{1-k}. \quad (7)$$

Соотношение (7) показывает, что термический КПД цикла Дизеля тем выше, чем больше степень сжатия  $\epsilon$  (как и в цикле Отто) и чем меньше степень предварительного расширения  $\rho$ .



Сравним между собой значения термических КПД циклов Отто и Дизеля, принимая в обоих циклах одинаковой либо степень сжатия  $\epsilon$ , либо наивысшую температуру рабочего тела в цикле  $T_3$ . Исходные параметры рабочего тела в начальной точке цикла ( $p_1, T_1$ ) считаем одинаковыми для обоих циклов.

Если принять, что степень сжатия в обоих циклах одна и та же, то из (5) и (7) очевидно, что термический КПД цикла Отто выше термического КПД цикла Дизеля. Однако сравнение КПД этих циклов при условии одинаковых значений  $\epsilon$  вряд ли правомерно, так как преимуществом цикла Дизеля по сравнению с циклом Отто является, как отмечалось выше, именно возможность достижения более высоких степеней сжатия.

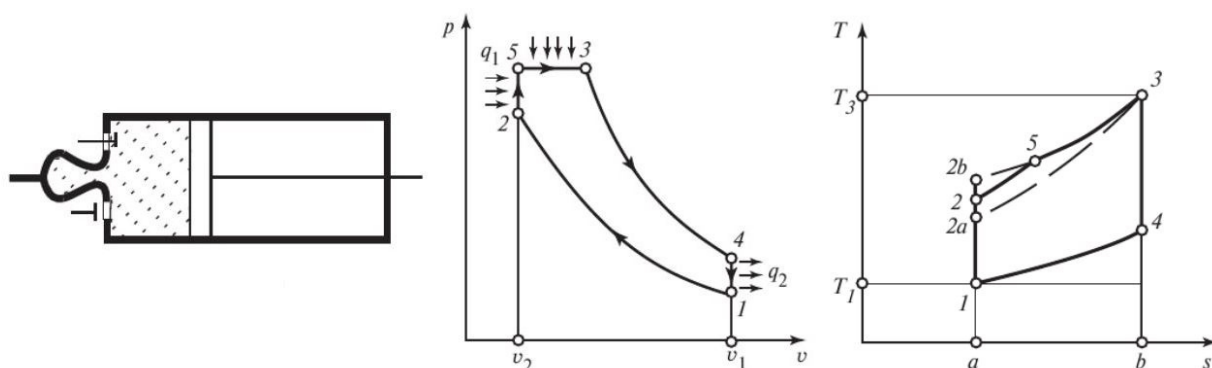
Сравнение значений  $\eta_T$  циклов Отто и Дизеля при условии одинаковой наивысшей температуры цикла  $T_3$  показывает, что в этом случае термический КПД цикла Дизеля будет выше, чем термический КПД цикла Отто. В частности, это видно и из  $T, s$  - диаграммы; поскольку  $c_p > c_v$ , то на  $T, s$ -диаграмме изохора идет более круто, чем изобара, и, значит, степень заполнения цикла Дизеля выше, чем цикла Отто.

При сравнении обоих циклов при равных работах цикла  $l = q_1 - q_2$ , и максимальном давлении легко заметить, что теплота  $q_2$  в цикле Отто больше, чем в цикле Дизеля, а термический КПД меньше. **Подобное сравнение наиболее оправдано и дает основание считать цикл Дизеля более экономичным, чем цикл Отто.**

Надо отметить, что двигатель Дизеля, может работать на более низкосортном топливе и не нуждается в применении карбюратора. Основным недостатком двигателя Дизеля по сравнению с двигателем Отто является необходимость затраты работы на привод устройства для распыления топлива и относительная тихоходность, обусловленная более медленным сгоранием топлива.

### 3. ЦИКЛ ТРИНКЛЕРА

Своего рода «гибридом» циклов Отто и Дизеля является цикл со смешанным сгоранием - цикл **Тринклера**<sup>1</sup> (иногда называемый также **циклом Сабатэ**).



Двигатели, работающие по этому типу, имеют так называемую **форкамеру**, соединенную с рабочим цилиндром узким каналом. В рабочем цилиндре воздух адиабатически сжимается за счет инерции маховика, сидящего на валу двигателя, нагреваясь при этом до температуры, обеспечивающей воспламенение жидкого топлива, подаваемого в форкамеру (процесс 1-2). Форма и расположение последней способствуют наилучшему смешению топлива с воздухом, в результате чего происходит быстрое сгорание части топлива в небольшом объеме форкамеры (процесс 2-5). Благодаря возрастанию давления в форкамере образовавшаяся в ней смесь несгоревшего топлива,

<sup>1</sup> По имени русского инженера Г.В. Тринклера, впервые предложившего этот цикл в 1904 году.

воздуха и продуктов сгорания проталкивается в рабочий цилиндр, где происходит догорание оставшегося топлива, сопровождающееся перемещением поршня слева направо при приблизительно постоянном давлении (процесс 5-3). По окончании сгорания топлива дальнейшее расширение продуктов сгорания (рабочий ход) происходит адиабатически (процесс 3-4), после чего отработавшие газы удаляются из цилиндра (процесс 4-1).

Таким образом, в цикле со смешанным сгоранием подвод теплоты  $q_1$  осуществляется вначале по изохоре ( $v = \text{const}$ ), а затем по изобаре ( $p = \text{const}$ ).

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. Вместе с тем цикл со смешанным сгоранием частично сохраняет преимущества цикла Дизеля перед циклом Отто - часть процесса сгорания осуществляется при постоянном давлении.

**Определим термический КПД цикла Тринклера.**

$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{|q_1|} = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_5) + c_v (T_5 - T_2)} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) \frac{T_1}{T_2}}{\left(\frac{T_5}{T_2} - 1\right) + k \frac{T_5}{T_2} \left(\frac{T_3}{T_5} - 1\right)} \quad (8)$$

Для изохоры 4-1 имеем:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1}, \quad (9)$$

Далее из свойств адиабат 1-2 и 3-4, с учётом  $p_3 = p_5$ ,  $v_2 = v_5$  можно получить:

$$\frac{T_4}{T_1} = \lambda \rho^k, \quad (10)$$

где  $\lambda = p_5/p_2$  - **степень повышения давления** в изохорном процессе сгорания, а  $\rho = v_3/v_5$  - **степень предварительного расширения** в изобарном процессе сгорания.

Для изохоры 2-5 имеем:

$$\frac{T_5}{T_2} = \lambda. \quad (11)$$

Для изобары 5-3 имеем:

$$\frac{T_3}{T_5} = \rho. \quad (12)$$

Отсюда для термического КПД цикла со смешанным сгоранием получаем:

$$\eta_T = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)} \epsilon^{1-k}. \quad (13)$$

При  $\rho = 1$  (это соответствует отсутствию изобарного процесса) уравнение (13) превращается в уравнение (5) для термического КПД цикла Отто, а при  $\lambda = 1$  (отсутствие изохорного процесса) уравнение (13) превращается в уравнение (7) для КПД цикла Дизеля.

Сравнение значения  $\eta_T$  для цикла со смешанным сгоранием со значениями  $\eta_T$  цикла Отто и цикла Дизеля показывает, что при одинаковых степенях сжатия  $\varepsilon$ :

$$\eta_T^{\text{Дизель}} < \eta_T^{\text{Тринклер}} < \eta_T^{\text{Отто}}, \quad (14)$$

а при одинаковых наивысших температурах цикла ( $T_3$ )

$$\eta_T^{\text{Дизель}} > \eta_T^{\text{Тринклер}} > \eta_T^{\text{Отто}}. \quad (15)$$

Приведённый анализ эффективности циклов двигателей внутреннего сгорания справедлив лишь для идеализированных циклов без учета необратимости и других факторов. В реальных циклах рабочее тело по своим свойствам отличается от идеального газа с постоянной теплоемкостью; вследствие неизбежного трения процессы адиабатного сжатия и расширения происходят не по изоэнтропе, а с ростом энтропии; принудительное охлаждение стенок цилиндра еще больше увеличивает отклонение этих процессов от изоэнтропных; сгорание происходит за малые, но всё же конечные промежутки времени, в течение которых поршень успевает несколько переместиться, так что условие изохорности процесса сгорания выполняется не совсем строго; имеют место механические потери в механизме и т.д. Поэтому для перехода от идеальных термодинамических циклов, исследованных выше, к реальным циклам необходимо вводить внутренний относительный КПД двигателя, который определяется экспериментально при его испытаниях.



#### 4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. Назовите основное преимущество двигателей внутреннего сгорания по сравнению с другими видами тепловых двигателей.
Ответ:
2. Какие три типа поршневых двигателей внутреннего сгорания различают?
Ответ:
3. Запишите формулу для определения термического КПД цикла Отто.
Ответ:
4. Изобразите в сравнении циклы Отто и Дизеля на T-s диаграмме при одинаковой максимальной температуре.
Ответ:
5. Запишите формулу для определения термического КПД цикла Тринклера.
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: