

Лекция 13

Элементы технической термодинамики (продолжение)

Двигатели внутреннего сгорания

Эти двигатели различают по виду топлива на бензиновые (**Цикл Отто**) и дизельные (**цикл Дизеля**). На рис. 1 представлена индикаторная диаграмма цикла бензинового двигателя

A1 – процесс всасывания паровоздушной смеси в объем цилиндра;
1 – 2 – сжатие этой смеси; в точке 2 возбуждение искры запального устройства (свечи);
2 – 3 – вспышка (взрыв) паров бензина в смеси с кислородом воздуха;
3 – 4 – процесс политропического расширения дымовых газов; в точке 4 – открытие выхлопного клапана;
4 – 1 процесс выхлопа дымовых газов в атмосферу

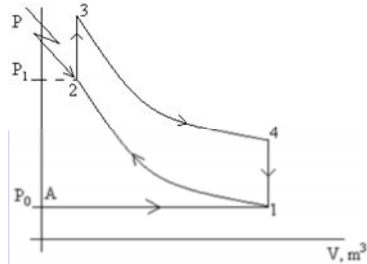


Рис.1

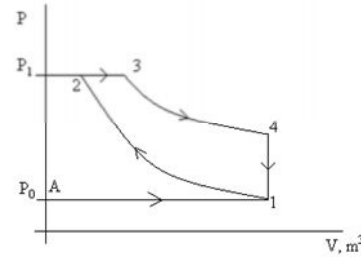


Рис. 2. Индикаторная диаграмма дизельного двигателя внутреннего сгорания.

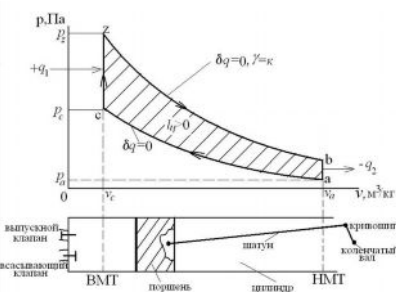
A1 – процесс всасывания чистого воздуха из атмосферы в цилиндр двигателя;
1 – 2 – процесс сжатия воздуха; в точке 2 – впрыск дизельного топлива в цилиндр;
2 – 3 – горение топлива; 3 – 4 – процесс политропического расширения;
т. 4 – открытие выхлопного клапана; 4 – 1 – выхлоп дымовых газов в атмосферу.

термический коэффициент полезного действия η_t двигателей внутреннего сгорания сильно зависит от степени сжатия p_1/p_2 (см. рис.1 и 2): чем больше эта степень, тем больше η_t . Для бензинового двигателя степень сжатия ограничена температурой самопроизвольной вспышки паров бензина в смеси с кислородом воздуха. Поэтому паровоздушную смесь приходится сжимать до температуры ниже температуры вспышки, а само горение (взрывного типа) инициируют с помощью искры в запальной свече. В дизельных двигателях сжимается чистый воздух, степень сжатия в таких двигателях ограничена только прочностными свойствами материалов для изготовления двигателей. Поэтому степень сжатия в дизельном двигателе много больше степени сжатия в бензиновом двигателе и, соответственно, η_t – тоже. Для бензиновых двигателей $\eta \approx 25\% - 30\%$, для дизельных $\eta \approx 40\% - 45\%$. Это значит, что из 10 литров бензина в баке на собственно движение автомобиля будет израсходовано только 2,5 литра, а остальное пойдет на обогрев атмосферы и экологическую грязь. Зато у дизельного двигателя чуть меньше половины топлива будет истрачено с пользой, а остальное – потери.

Термодинамические циклы ДВС

Цикл Отто

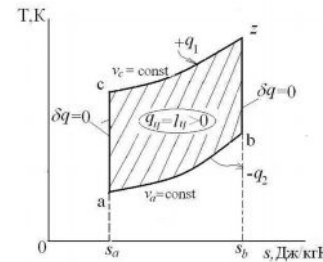
Четырехтактный газовый ДВС создан в 1876 году Н.А. Отто (1832-1891) Цикл Отто совершается в 4-х тактном тепловом двигателе внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием (карбюраторный ДВС) и кривошипно-шатунным механизмом. При этом поршень совершает возвратно-поступательное движение в цилиндре. Цикл Отто – прямой газовый изохорный цикл неполного расширения представлен в $p-v$ координатах на следующем рисунке



Этот цикл неполного расширения ($P_b > P_a$) состоит из двух изохорных и двух адиабатных процессов: где ac – сжатие ТРТ по адиабате; cz – подвод теплоты q_1 к ТРТ по изохоре; zb – расширение ТРТ по адиабате; ba – отвод теплоты q_2 в холодильник от ТРТ по изохоре.

После прохождения этого цикла ТРТ возвращается в начальное состояние. В результате этого цикла совершается положительная результирующая работа $l_{ц}$, равная площади $aczba$, которая передается на вал двигателя.

В $T-s$ координатах цикла Отто имеет вид:



Основные характеристики (параметры) цикла Отто:

- степень сжатия: $\varepsilon = v_a / v_c$ где v_a – полный объем цилиндра (в начале процесса сжатия), v_c – объем камеры сгорания (в конце процесса сжатия);
- степень повышения давления $\lambda = P_z / P_c$ в процессе подвода теплоты (при горении топливно-воздушной смеси), где P_z – давление ТРТ в конце подвода теплоты q_1 , P_c – давление ТРТ в начале подвода теплоты q_1 .

Параметрами цикла называются величины, которые полностью определяют цикл. Их число равно числу процессов в цикле без двух.

Термический КПД цикла Отто:

$$\left. \begin{aligned} \eta_t &= \frac{l_{ц}}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}; \\ q_1 &= c_v(T_z - T_c); \\ q_2 &= c_v(T_b - T_a) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \eta_t = 1 - \frac{c_v(T_b - T_a)}{c_v(T_z - T_c)} = 1 - \frac{T_a \left[\frac{T_b}{T_a} - 1 \right]}{T_c \left[\frac{T_z}{T_c} - 1 \right]}$$

Для адиабаты ac : $\frac{T_c}{T_a} = \left(\frac{v_a}{v_c}\right)^{\kappa-1} = \varepsilon^{\kappa-1}$

для изохоры $c-z$ $\frac{T_z}{T_c} = \frac{P_z}{P_c} = \lambda$

Дополнительное соотношение: $\frac{T_b}{T_a} = \frac{P_b}{P_a} = \frac{P_z}{P_c} \cdot \frac{\varepsilon^\kappa}{P_c} = \frac{P_z}{P_c} = \lambda$

$\longrightarrow \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = f(\varepsilon, \kappa)$

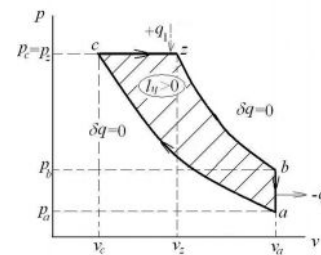
С ростом степени сжатия увеличивается максимальная температура в системе T_1 и в соответствии со 2-м законом термодинамики увеличивается термический КПД. С ростом показателя адиабаты κ термический КПД увеличивается из-за влияния рода ТРТ, т.е. теплоемкости идеального газа.

Недостатком цикла Отто является невозможность применения высоких степеней сжатия. Обычно применяются степени сжатия в диапазоне: $\varepsilon = 3,5-9$, что определяется температурой воспламенения топлива T_{ign} , которую не может превышать температура в конце процесса сжатия T_c из-за опасности взрывного самовозгорания топлива

Поршневой двигатель внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия с внутренним смесеобразованием был создан в 1897 году немецким инженером Р.Дизелем (1858-1913). В двигателях Дизеля распыление жидкого топлива в цилиндре двигателя производится воздухом высокого давления от специального компрессора из форсунки. При этом давление в конце процесса сжатия может составлять порядка $p_c = 32-36$ атм

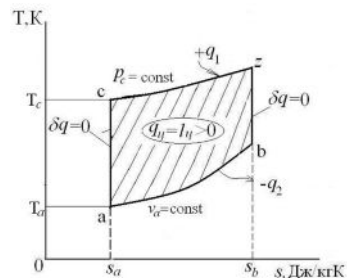
$\varepsilon = 16-18$

Идеальный цикл Дизеля состоит из изобарного, двух адиабатных и изохорного процессов и является прямым газовым изобарным циклом неполного расширения, который изображен в $p-v$ и $T-s$ координатах на следующих рисунках



ac – адиабатное сжатие чистого воздуха;
 cz – изобарный подвод теплоты q_1 ;
 zb – адиабатное расширение ТРТ;
 ba – изохорный отвод теплоты q_2 в холодильник.

Основные характеристики (параметры) цикла:
 - степень сжатия;
 - степень предварительного изобарного расширения в процессе подвода теплоты q_1



Ts- диаграмма

Термический КПД цикла Дизеля

$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_b - T_a)}{c_p(T_z - T_c)} = 1 - \frac{T_a \left(\frac{T_b}{T_a} - 1\right)}{\kappa T_c \left(\frac{T_z}{T_c} - 1\right)}$

$\frac{T_c}{T_a} = \left(\frac{v_a}{v_c}\right)^{\kappa-1} = \varepsilon^{\kappa-1}$ адиабата ac

$\frac{T_z}{T_c} = \frac{v_z}{v_c} = \rho$ изобара $c-z$ (закон Гей-Люссака)

$\frac{T_b}{T_a} = \frac{P_b}{P_a} = \left(\frac{v_z}{v_c}\right)^\kappa = \rho^\kappa$ изохора ba и адиабаты zb и ca $\longrightarrow \eta_t = 1 - \frac{\rho^\kappa - 1}{\kappa \varepsilon^{\kappa-1} (\rho - 1)}$

С ростом степени сжатия термический КПД цикла Дизеля растет, а с увеличением степени предварительного изобарного расширения цикла Дизеля - уменьшается из-за роста температуры ТРТ при выхлопе (из-за роста теплоты q_2).
 В двигателе Дизеля сжимается чистый воздух и можно применить большие степени сжатия по сравнению со степенью сжатия в двигателе, работающем по циклу Отто.

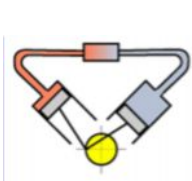


Двигатель Стirlingа — тепловая машина, в которой жидкое или газообразное рабочее тело движется в замкнутом объёме. Это - разновидность **двигателя внешнего сгорания**. Основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела с извлечением энергии из возникающего при этом изменения объёма рабочего тела (имеет внешний подвод теплоты через теплопроводящую стенку). Может работать не только от сжигания топлива, но и от любого источника тепла.

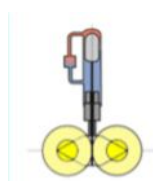
Двигатель Стirlingа был впервые запатентован шотландским священником Робертом Стirlingом 27.09.1816 г. (английский патент № 4081). Однако первые элементарные «двигатели горячего воздуха» были известны ещё в конце XVII века, задолго до Стirlingа. Достижением Стirlingа является добавление очистителя, который он назвал «эконом».

В современной научной литературе этот очиститель называется «регенератор». Он увеличивает производительность двигателя, удерживая тепло в тёплой части двигателя, в то время как рабочее тело охлаждается. Этот процесс намного повышает эффективность системы. Чаще всего рекуператор представляет собой камеру, заполненную проволокой, гранулами, гофрированной фольгой (гофры идут вдоль направления потока газа). Газ, проходя через наполнитель рекуператора в одну сторону, отдаёт (или приобретает) тепло, а при движении в другую сторону отбирает (отдаёт) его.

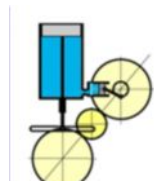
Инженеры подразделяют двигатели Стирлинга на **три различных типа**:



α-Стирлинг



β-Стирлинг



γ-Стирлинг

Существуют разновидности двигателя Стирлинга не попадающие под эти три классических типа

Альфа-Стирлинг — содержит два отдельных силовых поршня в отдельных цилиндрах. Один поршень — горячий, другой — холодный. Цилиндр с горячим поршнем находится в теплообменнике с более высокой температурой, в то время как цилиндр с холодным поршнем находится в более холодном теплообменнике. У данного типа двигателя отношение мощности к объёму достаточно велико, но, к сожалению, высокая температура «горячего» поршня создаёт определённые технические проблемы.

Регенератор находится между горячей частью соединительной трубки и холодной

Бета-Стирлинг — цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движется поршень (с которого снимается мощность) и «вытеснитель», изменяющий объём горячей полости. Газ перекачивается из холодной части цилиндра в горячую через регенератор. Регенератор может быть внешним, как часть теплообменника, или может быть совмещён с поршнем-вытеснителем

Гамма-Стирлинг — тоже есть поршень и «вытеснитель», но при этом два цилиндра — один холодный (там движется поршень, с которого снимается мощность), а второй горячий с одного конца и холодный с другого (там движется «вытеснитель»). Регенератор может быть внешним, в этом случае он соединяет горячую часть второго цилиндра с холодной и одновременно с первым (холодным) цилиндром. Внутренний регенератор является частью вытеснителя.

Недостатки

- 1. Материалоёмкость** — основной недостаток двигателя. У двигателей внешнего сгорания вообще, и двигателя Стирлинга в частности, рабочее тело необходимо охлаждать, и это приводит к существенному увеличению массо-габаритных показателей силовой установки за счёт увеличенных радиаторов.
- Для получения характеристик, сравнимых с характеристиками ДВС, приходится применять **высокие давления (свыше 100 атм) и специальные виды рабочего тела** — водород, гелий.
- 3. Тепло не подводится к рабочему телу непосредственно**, а только через стенки теплообменников. Стенки имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего КПД оказывается ниже, чем можно было ожидать. Горячий теплообменник работает в очень напряжённых условиях теплопередачи, и при очень высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогих материалов. Создание теплообменника, который удовлетворял бы противоречивым требованиям, весьма трудно. Чем выше площадь теплообмена, тем меньше потери тепла. При этом растёт размер теплообменника и объём рабочего тела, не участвующий в работе. Поскольку источник тепла расположен снаружи, двигатель медленно реагирует на изменение теплового потока, подводимого к цилиндру, и не сразу может выдать нужную мощность при запуске.
- 4. Для быстрого изменения мощности двигателя используются методы, отличные от тех, которые применялись в двигателях внутреннего сгорания:** буферная ёмкость изменяемого объёма, изменение среднего давления рабочего тела в камерах, изменение фазного угла между рабочим поршнем и вытеснителем. В последнем случае реакция двигателя на управляющее действие водителя является практически мгновенной.

Тем не менее, двигатель Стирлинга имеет преимущества, которые вынуждают заниматься его разработкой

«Всеядность» двигателя — как все двигатели внешнего сгорания (вернее — внешнего подвода тепла), двигатель Стирлинга может работать от почти любого перепада температур: например, между разными слоями воды в океане, от солнца, от ядерного или изотопного нагревателя, угольной или дровяной печи и т. д.

Простота конструкции — конструкция двигателя очень проста, он не требует дополнительных систем, таких как газораспределительный механизм. Он запускается самостоятельно и не нуждается в стартере. Его характеристики позволяют избавиться от коробки передач. Однако, как уже отмечалось выше, он обладает большей материалоёмкостью.

Увеличенный ресурс — простота конструкции, отсутствие многих «нежных» агрегатов позволяет стирлингу обеспечить небывалый для других двигателей ресурс в десятки и сотни тысяч часов непрерывной работы.

Экономичность — в случае преобразования в электричество солнечной энергии стирлинги иногда дают больший КПД (до 31,25 %), чем тепловые машины на пару.

Бесшумность двигателя — стирлинг не имеет выхлопа, а значит — не шумит. Бета-стирлинг с ромбическим механизмом является идеально сбалансированным устройством и, при достаточно высоком качестве изготовления, даже не имеет вибраций (амплитуда вибрации меньше 0,0038 мм).

Экологичность — сам по себе стирлинг не имеет каких-то частей или процессов, которые могут способствовать загрязнению окружающей среды. Он не расходует рабочее тело. Экологичность двигателя обусловлена прежде всего экологичностью источника тепла. Стоит также отметить, что обеспечить полноту сгорания топлива в двигателе внешнего сгорания проще, чем в двигателе внутреннего сгорания.

Применение

Двигатель Стирлинга с линейным генератором переменного тока
Двигатель Стирлинга применим в случаях, когда необходим компактный преобразователь тепловой энергии, простой по устройству, либо когда эффективность других тепловых двигателей оказывается ниже: например, если разницы температур недостаточно для работы паровой или газовой турбины.

Двигатели Стирлинга могут применяться для превращения в электроэнергию любой теплоты. На них возлагают надежды по созданию солнечных электростанций.

Для преобразования солнечной энергии в электрическую двигатель Стирлинга устанавливается в фокус параболического зеркала, (похожего по форме на спутниковую антенну) таким образом, чтобы область нагрева была постоянно освещена. Параболический отражатель управляется по двум координатам при слежении за солнцем. Энергия солнца фокусируется на небольшой площади. Зеркала отражают около 92 % падающего на них солнечного излучения. В качестве рабочего тела используется, как правило, водород или гелий. В феврале 2008 г. Национальная лаборатория Sandia достигла эффективности 31,25 % в установке, состоящей из параболического концентратора и двигателя Стирлинга

Насосы

Эффективность систем отопления или охлаждения возрастает, если в контуре установлен насос принудительной подачи теплоносителя. Установка электрического насоса снижает живучесть системы, а в быту неприятно тем, что электросчётчик «накручивает» ощутимую сумму. Насос, использующий принцип двигателя Стирлинга, решает эту проблему.

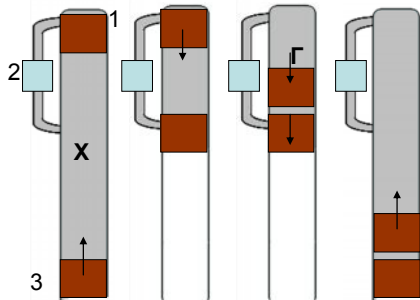
"Стирлинг" для перекачки жидкостей может быть гораздо проще привычной схемы «двигатель-насос». В двигателе Стирлинга вместо рабочего поршня может использоваться перекачиваемая жидкость, которая одновременно служит для охлаждения рабочего тела.

Насос на основе двигателя Стирлинга может служить для накачки воды в ирригационные каналы посредством солнечного тепла, для подачи горячей воды от солнечного коллектора в дом (в системах отопления теплоаккумулятор стараются установить как можно ниже, чтобы вода шла в радиаторы самотёком).

Стирлинг-насос может использоваться для перекачки химических реагентов, поскольку абсолютно герметичен.

Практически, все холодильники используют те же тепловые насосы. Применительно к системам охлаждения их судьба оказалась более счастливой. Ряд производителей бытовых холодильников собирается установить на свои модели "стирлинги". Они будут обладать большей экономичностью, а в качестве рабочего тела будут использовать обычный воздух.

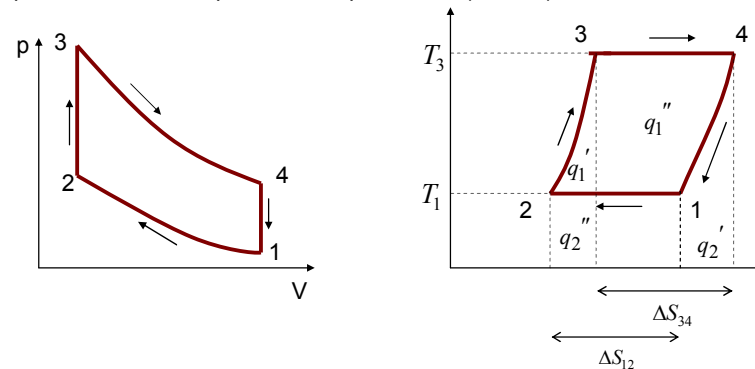
Работа двигателя Стирлинга может быть разделена на 4 стадии



На первой стадии все рабочее тело находится в холодной полости X. На второй стадии поршень 3, перемещаясь вверх, сжимает рабочее тело в холодной полости. Температура в рабочем теле при этом сохраняется постоянной за счет отвода теплоты через стенки цилиндра (изотермический процесс 1-2). На третьей стадии вытеснитель 1, перемещаясь вниз, вытесняет рабочее тело из холодной полости в горячую при постоянном объеме.

Особенностью двигателя Стирлинга является полная регенерация теплоты изохорных процессов. С этой целью перемещение рабочего тела из холодной в горячую полость осуществляется через регенератор 2. Регенератор, отдавая теплоту рабочему телу, охлаждается, а рабочее тело нагревается до температуры T_3 (изохорный процесс 2-3). В горячей полости двигателя рабочее тело расширяется, сохраняя температуру за счет подвода теплоты от горячего источника теплоты через поверхность верхней крышки цилиндра (изотермический процесс 3-4). Затем вытеснитель 1, перемещаясь вверх, вытесняет рабочее тело из горячей полости в холодную.

Цикл двигателя Стирлинга в координатах а) V-P; б) T-S



Термический КПД двигателя Стирлинга равен термическому КПД цикла Карно

файл «Техническая термодинамика.pdf - (1-159 стр)

Барилевич В.А., Смирнов Ю.А. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена. Учебное пособие, 2010