

# О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ТЕПЛОТЫ В РАБОТУ ИЛИ ЧТО ОБЩЕГО У ВАШЕЙ МАШИНЫ С ГИПЕРЗВУКОВЫМ САМОЛЁТОМ БУДУЩЕГО

Лекция №1

1. Законы термодинамики 0, 1, 2, 3.....	1
1.1. Необходимые понятия и определения.....	1
1.2. Энергия, теплота и работа .....	3
1.3. Термодинамические циклы .....	4
2. Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) .....	5
3. Газотурбинные двигатели (ГТД).....	7
4. Воздушно-реактивные двигатели (ВРД) .....	8
5. Прямоточные воздушные реактивные двигатели (ПВРД) .....	9
6. Гиперзвуковые двигатели (ГПВРД) .....	10
7. Что общего у вашей машины с гиперзвуковым самолётом будущего?.....	10

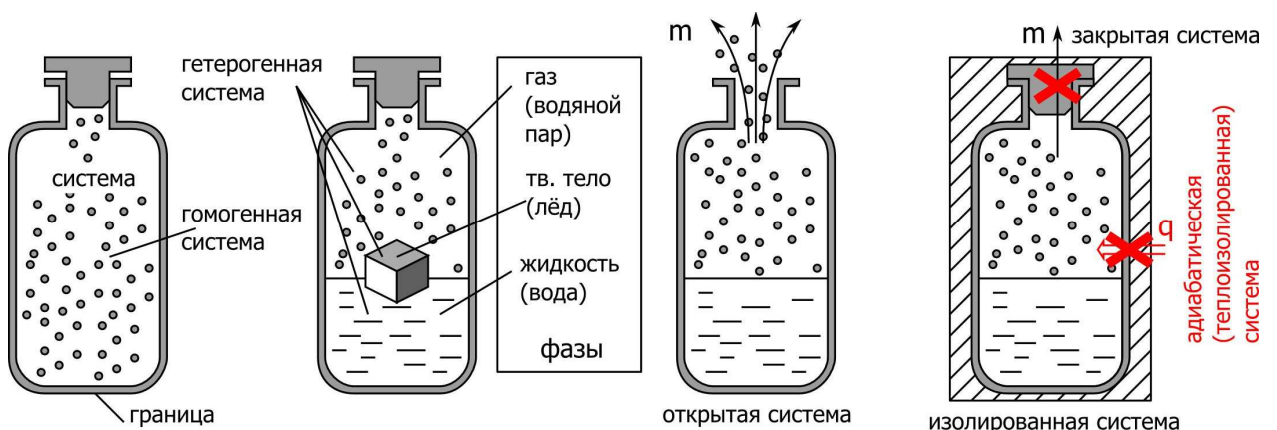
## 1. ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ 0, 1, 2, 3

### 1.1. НЕОБХОДИМЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Термодинамика** – это наука о закономерностях превращения энергии.

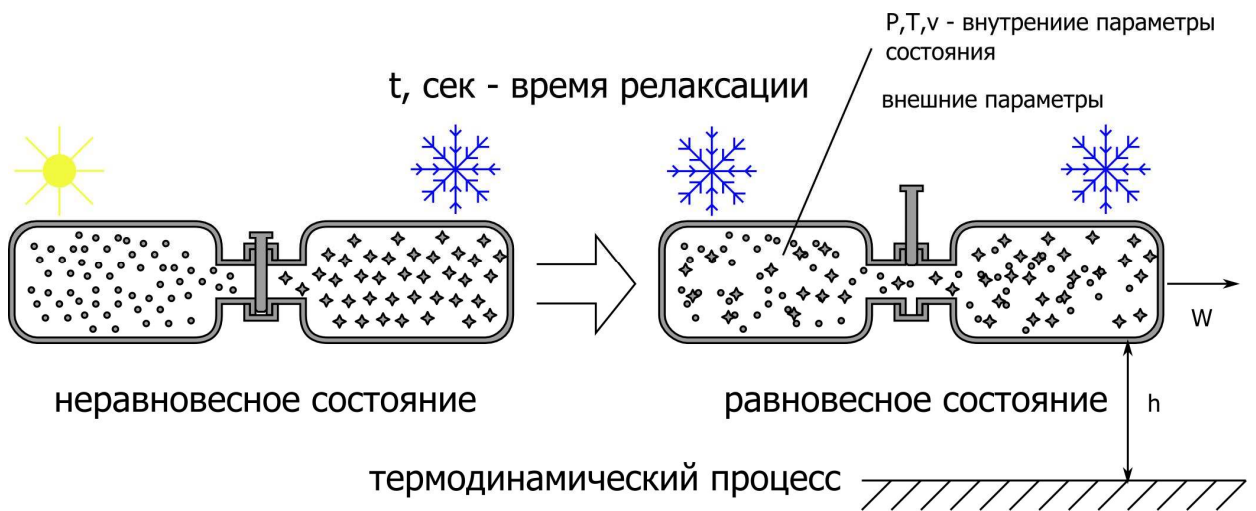
Законы термодинамики формулируются в общей форме и применимы к любым **термодинамическим системам** - биологические объекты, технические системы, астрономические тела и скопления тел. Кроме того сегодня законы термодинамики находят применение и в общественных науках (социология, экономика). Поскольку мы с вами будем говорить о технических системах, то в первую очередь нас будет интересовать **техническая термодинамика**.

Под **термодинамической системой** понимают совокупность материальных тел, взаимодействующих как между собой, так и с окружающей средой, и являющихся объектами исследования. Как следствие система имеет определенные границы, отделяющие ее от окружающей среды.



**Основной постулат термодинамики** – термодинамическая система с течением времени всегда переходит в состояние **термодинамического равновесия** и самопроизвольно из этого состояния выйти не может.

Термодинамическое равновесие характеризуется неизменными во времени параметрами системы, такими как **давление, плотность, температура** и т.д. во всех частях системы.

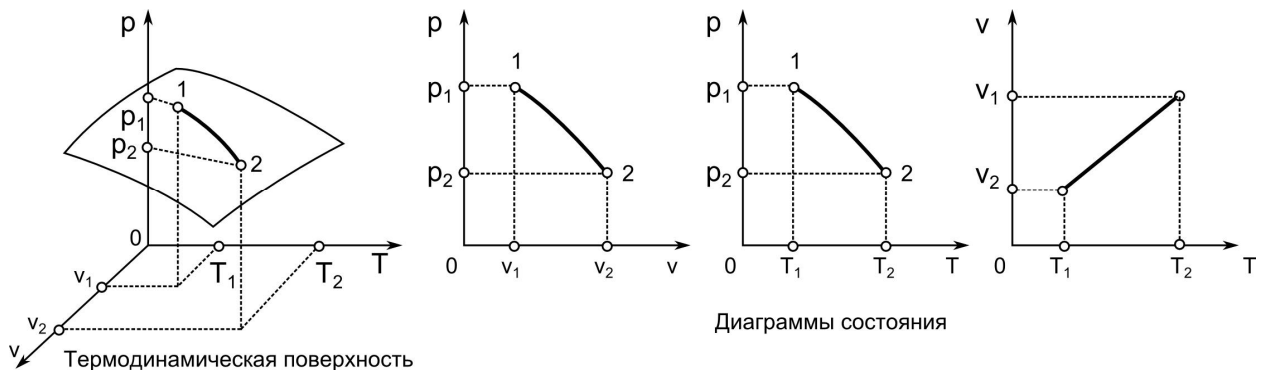


**Абсолютным давлением** ( $p$ ) называется сила, действующая по нормали к поверхности тела и отнесенная к единице площади этой поверхности.

**Абсолютная температура** ( $T$ ) отражает состояние внутреннего термического равновесия термодинамической системы. Другими словами температура это удобная величина для измерения внутренней энергии системы.

**Плотность** ( $\rho$ ) - это количество вещества заключённое в единице объёма. Обратная величина от плотности - это удельный объём ( $v$ ).

При отсутствии внешних воздействий на систему состояние чистого вещества однозначно определено, если заданы два из перечисленных параметров.



Связь между параметрами состояния может быть представлена графически в системе координат  $p, v, T$  в виде так называемой **термодинамической поверхности** или в виде набора двумерных **диаграмм состояния**  $p, v$ ;  $p, T$  и  $v, T$ .

Под **термодинамическим процессом** понимают ряд последовательных состояний системы при изменении хотя бы одного из параметров состояния под влиянием внешних воздействий.

Линию 1-2, изображающую изменение параметров в процессе, называют **кривой процесса**. Каждая точка кривой процесса характеризует равновесное состояние системы.

Равновесный процесс, в течение которого **температура системы сохраняется постоянной**, называют **изотермическим**. Кривую изотермического процесса называют **изотермой**.

Равновесный процесс, протекающий **при постоянном давлении**, называют **изобарным**. Кривую изобарного процесса называют **изобарой**.

Равновесный процесс, протекающий **при постоянном объеме**, называют **изохорным**. Кривую изохорного процесса называют **изохорой**.

Равновесный процесс, в котором **теплота** к термодинамической системе **не подводится от окружающей среды (и не отводится в окружающую среду)**, называют **адиабатным**. Кривую адиабатного процесса называют **адиабатой**.

## 1.2. ЭНЕРГИЯ, ТЕПЛОТА И РАБОТА

В термодинамике рассматриваются все виды энергии, но прежде всего энергия движения. Например, ядерная энергия обусловлена движением субъядерных частиц (нейтрон, протон) внутри ядра; энергия химических связей – это движение электронов образующих общую электронную оболочку молекулы и т.д. Можно сказать, что **энергия является мерой движения**.

Независимо от вида воздействия на систему (перемещение в силовых полях, облучение, конвективный нагрев, химические, ядерные реакции и т.д.) эти воздействия считаются эквивалентными, если приводят к одинаковому изменению **энергии** термодинамической системы.

Общую энергию термодинамической системы принято рассматривать как сумму **кинетической энергии** системы как целого, **потенциальной энергии** системы в поле действия какой-либо силы и **внутренней энергии**.

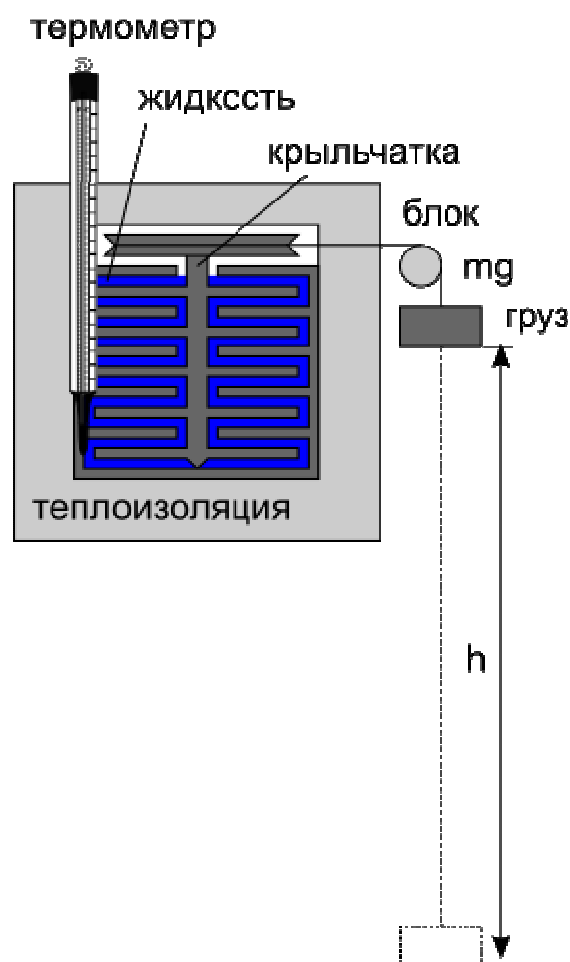
**Теплота и работа являются формами передачи энергии**. Различие между теплотой и работой состоит в том, что они являются различными формами передачи энергии.

**Теплота** представляет собой такую форму передачи энергии, которая определяется либо непосредственным контактом между термодинамическими системами (теплопроводность, конвекция), либо лучистым переносом энергии.

**Работа** представляет собой иной механизм передачи энергии. В случае механической работы обязательно имеет место изменение объема термодинамической системы.

В середине XIX века английский физик Джеймс Прескотт Джоуль провел опыты по определению соотношения между работой, затрачиваемой при выделении теплоты, и количеством выделившейся теплоты.

Схема опыта Джоуля представлена на рисунке. В теплоизолированный медный сосуд заполненный водой, погружена крыльчатка. Крыльчатка приводится во вращение при перемещении груза связанного с ней тросом через блок. Работа, производимая грузом (и, следовательно, крыльчаткой), равняется убыли потенциальной энергии груза. Теплота,



выделившаяся в сосуде с водой, вычисляется по повышению температуры воды, измеряемой термометром.

В результате серии тщательно поставленных опытов Джоуль установил, что между затраченной работой и полученной теплотой существует прямая пропорциональность, и **коэффициент пропорциональности всегда сохраняет одно и то же значение независимо от способа получения теплоты, вида работы, температуры тела и т. д.**

При затрате одной и той же работы выделяется всегда одна и та же теплота. Полученная теплота всегда эквивалентна затраченной работе и, соответственно, наоборот.

Закон сохранения энергии был давно известен в механике применительно к механической (кинетической и потенциальной) энергии. После того как работами **Джоуля, Майера** и других ученых был установлен принцип эквивалентности теплоты и работы, закон сохранения был распространен на другие виды энергии и в соответствии с его содержанием стал называться **законом сохранения и превращения энергии**.

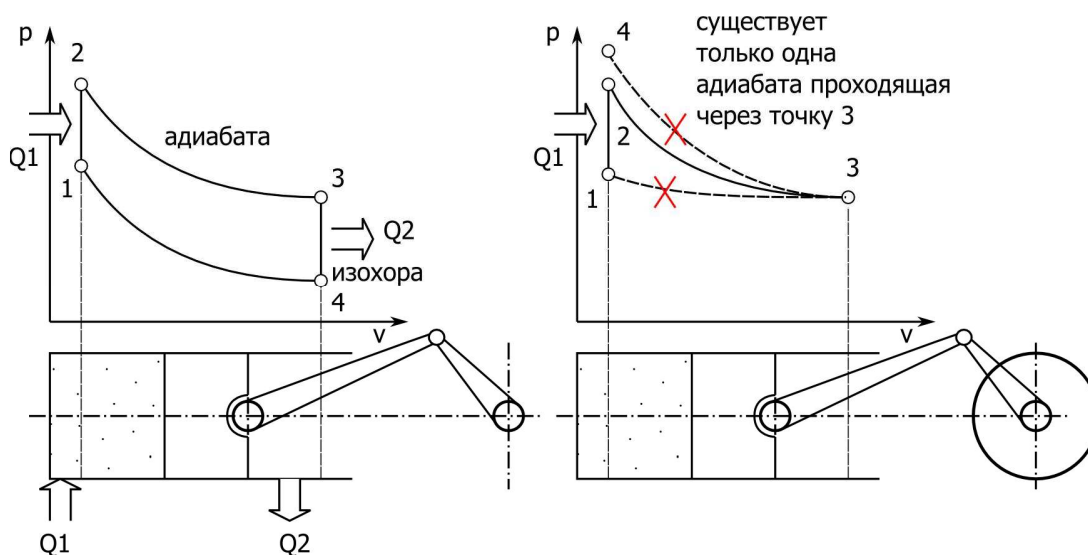
Этот закон гласит: **энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических и химических процессах,**

**или для любой изолированной системы количество энергии, заключенной в этой системе, сохраняется неизменным.**

### 1.3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

Опыты Джоуля демонстрируют возможность получения теплоты из работы и устанавливают связь между этими величинами. Однако получение работы из теплоты не является столь же простой задачей. Как правило, для получения работы из теплоты необходимо осуществить **круговой термодинамический процесс или, говорят, совершить термодинамический цикл**. Термодинамический цикл может быть непрерывным или состоять из ряда частных термодинамических процессов.

Тепловые двигатели работают таким образом, что **газ (рабочее тело)** расширяется при получении теплоты  $Q_1$  от источника, имеющего высокую температуру. Для того чтобы вернуться в первоначальное состояние, можно снова сжать рабочее тело, но при этом полезная работа получена не будет. Для получения полезной работы необходимо в процессе расширения понизить давление газа путем отвода от него части теплоты  $Q_2$  к источнику с более низкой температурой. Полученная работа расширения  $L_{\text{расш}}$  определяется площадью под кривой 2-3, затраченная на сжатие работа  $L_{\text{сж}}$  эквивалентна площади под кривой 1-4.



В результате осуществления этих процессов рабочее тело прошло через ряд последовательных изменений состояния и вернулось к исходному состоянию. Термодинамический цикл может быть начат сначала и совершён любое число раз.

Как видно, для получения полезной работы в цикле двигателя необходимо совершить **компенсирующий процесс** - отвод теплоты в источник с низкой температурой. Необходимость совершения этого процесса и, как следствие обязательное наличие двух источников теплоты с разной температурой, составляет суть второго закона термодинамики.

**Невозможно получить работу за счет энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии.**

Существует много эквивалентных друг другу словесных формулировок второго закона, например:

**«Тепло не может самопроизвольно переходить от менее нагретого тела к более нагретому телу» (Клаузиус).**

**«Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом действия которой было бы совершение механической работы за счет охлаждения теплового резервуара» (Планк, Томсон).**

Согласно формулировке Планка нельзя, получив теплоту из некоторого резервуара, превратить ее в работу и не отдавать часть полученной теплоты в резервуар с более низкой температурой вернуться к исходным параметрам рабочего тела (**не существует адиабатного процесса 3-1**).

Из формулировки Клаузиуса следует, что невозможно передать теплоту к высокотемпературному источнику, без каких-либо дополнительных условий (**не существует адиабатного процесса 3-4**).

Степень совершенства преобразования теплоты в работу в цикле оценивается отношением полученной работы  $L_{ц} = Q_1 - Q_2$  к подведенной теплоте  $Q_1$ . Это соотношение называют термическим КПД:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

Так как отводимая от рабочего тела машины теплота  $Q_2$  не может равняться нулю, то  $\eta$ , всегда меньше 1.

**Второй закон исключает возможность построения «вечного двигателя второго рода», который бы совершал работу за счет энергии тел, находящихся в тепловом равновесии, подобно тому, как первый закон термодинамики исключает возможность построения «вечного двигателя первого рода», который бы совершал работу «из ничего», без внешнего источника энергии.**

## **2. ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС)**

**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.).

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

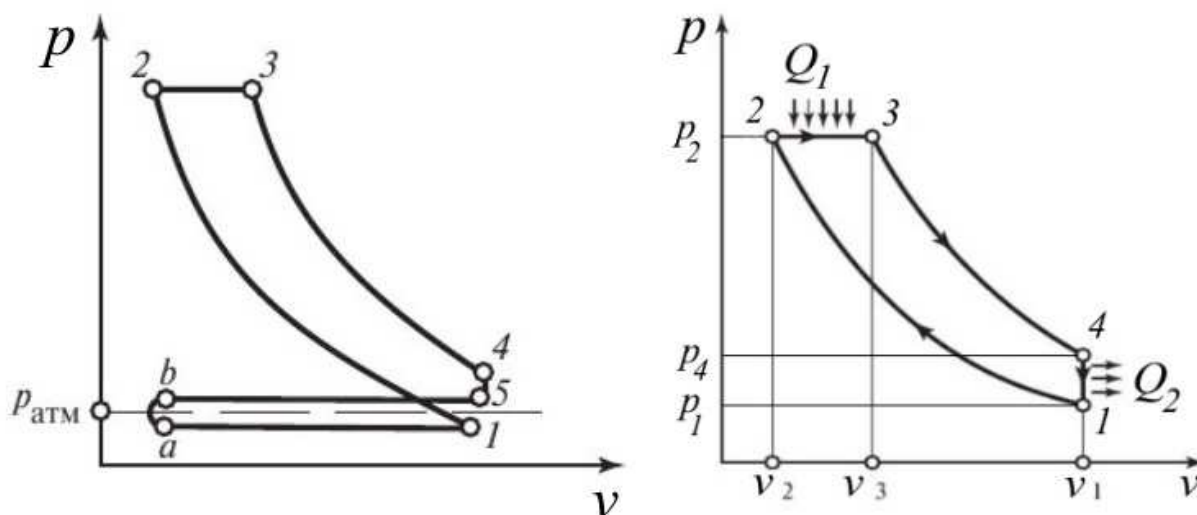
Во-первых, благодаря тому что **горячий источник теплоты находится внутри самого двигателя**, отпадает необходимость в больших теплообменных поверхностях, через которые осуществляется подвод теплоты от горячего источника к рабочему телу. Это приводит к большей компактности двигателей внутреннего сгорания.

Во-вторых, в двигателях внутреннего сгорания **предельное значение температуры рабочего тела может существенно превосходить предел прочности используемых конструкционных материалов**. Как правило, стенки цилиндра и головки блока цилиндров имеют принудительное охлаждение, что позволяет расширить температурные границы цикла и 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.

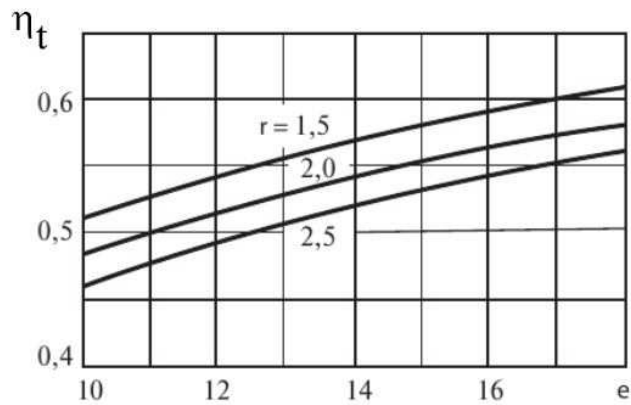
Различают три основных вида циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания: **цикл Отто** (сгорание при  $v = \text{const}$ ), **цикл Дизеля** (сгорание при  $p = \text{const}$ ) и **цикл Тринклера** (сгорание при  $v = \text{const}$  и затем при  $p = \text{const}$ ).

Рассмотрим работу ДВС на примере цикла Дизеля, названного по имени немецкого инженера Р. Дизеля, построившего такой двигатель в 1897 году.



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  $\epsilon = v_1/v_2 = 15-16$ ). 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  $p = \text{const}$ .

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**.



### 3. ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ГТД)

Одним из основных недостатков, присущих поршневым двигателям внутреннего сгорания, является **неизбежная неравномерность работы двигателя** во времени - в течение цикла температуры и давления в цилиндре резко меняются; для преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное неизбежно применение кривошипно-шатунного механизма. Средняя скорость рабочего тела относительно двигателя невелика. Все эти обстоятельства не позволяют при создании двигателей внутреннего сгорания сосредоточить большую мощность в одном агрегате.

От этих недостатков свободен двигатель внутреннего сгорания другого типа - **газотурбинный двигатель (ГТД)**.

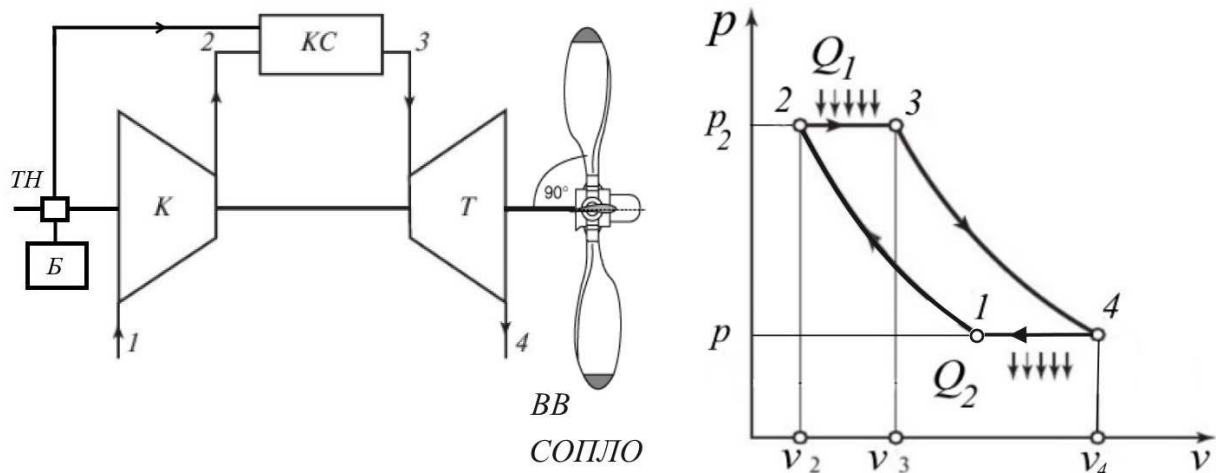
Цикл газотурбинного двигателя состоит из тех же процессов, что и цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания. Различие заключается в следующем: если **в поршневом двигателе эти процессы происходят последовательно, один за другим, в одном и том же элементе двигателя - цилиндре**, то **в газотурбинном двигателе эти процессы происходят в различных элементах**. Таким образом, в нём нет такой неравномерности условий работы элементов двигателя, как в поршневом двигателе.

В газотурбинных двигателях средняя скорость рабочего тела в 50 - 100 раз выше, чем в поршневых двигателях. Все это позволяет сосредоточить **в малогабаритных газотурбинных двигателях большие мощности**. В настоящее время газотурбинные двигатели широко применяются в авиации.

Циклы газотурбинных двигателей разделяются на те же группы, что и циклы поршневых двигателей: со сгоранием при  $p = \text{const}$  и со сгоранием при  $v = \text{const}$ . Мы рассмотрим только циклы с подводом теплоты при постоянном давлении, как наиболее распространённые.

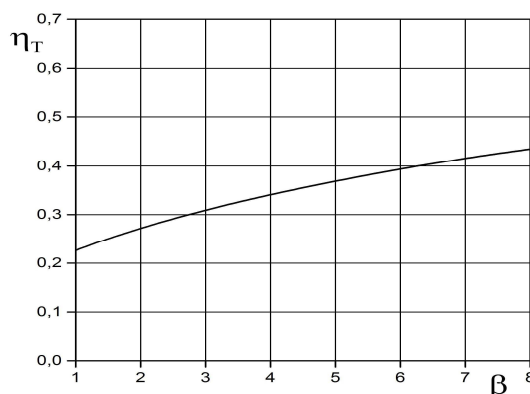
На общем валу находятся газовая турбина (Т), компрессор (К), топливный насос (ТН) и потребитель, например, воздушный винт (ВВ). Компрессор засасывает атмосферный воздух, сжимает его до некоторого давления и направляет в камеру сгорания (КС). Туда же топливным насосом из бака (Б) подается топливо, которое может быть как жидким, так и газообразным; в последнем случае вместо насоса применяется газовый компрессор.

Сгорание топлива происходит в камере сгорания при  $p = \text{const}$ . Продукты сгорания, расширившись в соплах газовой турбины, попадают на лопатки турбины, производят там работу за счет своей кинетической энергии и затем выбрасываются в атмосферу через выпускной патрубок. Давление отработавших газов несколько превышает атмосферное (поскольку отработавшим газам нужно преодолеть сопротивление выходного патрубка).



На  $p-v$  - диаграмме процесс 1-2 представляет собой адиабатное сжатие воздуха в компрессоре. Обычно давление в компрессоре не превышает 3 МПа. По изобаре 2-3 к рабочему телу подводится теплота (этот процесс соответствует сгоранию топлива в камере сгорания). Температура продуктов сгорания достигает 1000-1800К. Далее рабочее тело адиабатно расширяется в сопловом аппарате турбины и отдает работу турбинному колесу (3-4) и внешнему потребителю. Изобарный процесс 4-1 соответствует выходу отработавших газов из турбины. **Такие циклы часто называют разомкнутыми.**

Цикл газотурбинного двигателя иногда называют **циклом Брайтона**.



#### 4. ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ВРД)

Реактивный двигатель представляет собой устройство, в котором **химическая энергия топлива преобразуется в кинетическую энергию струи рабочего вещества (газа)**, расширяющегося в соплах. Эта струя создает тягу за счет реактивного действия рабочего тела, вытекающего из двигателя в сторону противоположную направлению движения.

**Воздушно-реактивные двигатели (ВРД)** несут на борту только запас горючего, а в качестве окислителя используется кислород атмосферного воздуха. ВРД пригодны для работы только в атмосфере Земли. По принципу действия ВРД делятся на **компрессорные и бескомпрессорные**.

В **турбокомпрессорном воздушно-реактивном двигателе (ТРД)** жидкое горючее, подаваемое из топливных баков, сгорает в камере сгорания КС, и затем продукты сгорания, расширившись в сопле СОПЛО, выбрасываются во внешнюю среду. Окислителем служит кислород воздуха. Для того чтобы повысить КПД двигателя, применяют предварительное сжатие воздуха. Воздух, засасываемый из атмосферы через диффузор, сжимается осевым или центробежным компрессором (К) и только после этого



поступает в камеру сгорания. Привод компрессора осуществляется от специальной газовой турбины (Т), на вращение которой расходуется часть располагаемой работы продуктов сгорания (компрессор с приводом от газовой турбины называется турбокомпрессором). Пройдя через газовую турбину, продукты сгорания расширяются в сопле.

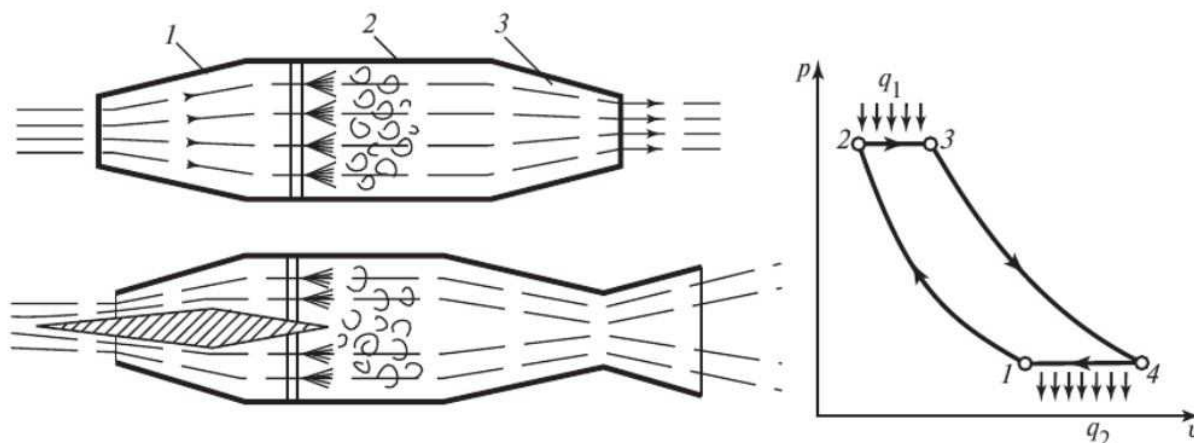
Цикл ТРД осуществляется следующим образом: сжатие воздуха в турбокомпрессоре от атмосферного давления  $p_1$  до давления  $p_2$  происходит по адиабате 1-2. Затем к рабочему телу подводится теплота  $Q_1$ , выделяющаяся при сгорании топлива; этот процесс происходит при постоянном давлении (изобара 2-3). Расширение рабочего тела (воздух + продукты сгорания) в газовой турбине и затем в реактивном сопле двигателя осуществляется по адиабате 3-4. Цикл замыкается изобарой 4-1 при давлении, равном атмосферному.

Из сказанного следует, что **цикл ВРД (ТРД) принципиально ничем не отличается от цикла газотурбинного двигателя со сгоранием при  $p = \text{const}$** , рассмотренного ранее.

Турбокомпрессорный воздушно-реактивный двигатель в настоящее время является основным типом двигателя для скоростных самолетов.

## 5. ПРЯМОТОЧНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ПВРД)

В **бескомпрессорных ВРД** компрессор отсутствует, и предварительное сжатие воздуха осуществляется только за счет торможения набегающего потока воздуха. Такие двигатели называются **прямоточными воздушно-реактивными двигателями (ПВРД)**.



В схеме этого двигателя отсутствуют компрессор и турбина. Сжатый в диффузоре 1 от атмосферного давления  $p_1$  до давления  $p_2$  воздух поступает в камеру сгорания 2, в которую впрыскивается жидкое топливо. Процесс сгорания происходит при практически постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ). Продукты сгорания, имеющие высокую температуру, вытекают из сопла 3.

Таким образом, цикл ПВРД состоит из адиабаты сжатия воздуха в диффузоре (1-2), изобары процесса сгорания (2-3), адиабаты расширения в сопле (3-4) и замыкающей цикл изобары охлаждения продуктов сгорания (4-1).

С точки зрения термодинамики цикл ПВРД аналогичен циклу газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении и циклу ТРД. КПД этого цикла тем больше, чем выше степень повышения давления  $\beta$ , т.е. чем выше скорость движения самолёта, на котором установлен этот двигатель. Скорость набегающего потока воздуха обеспечивает динамическое давление, превращающееся при торможении в диффузоре в

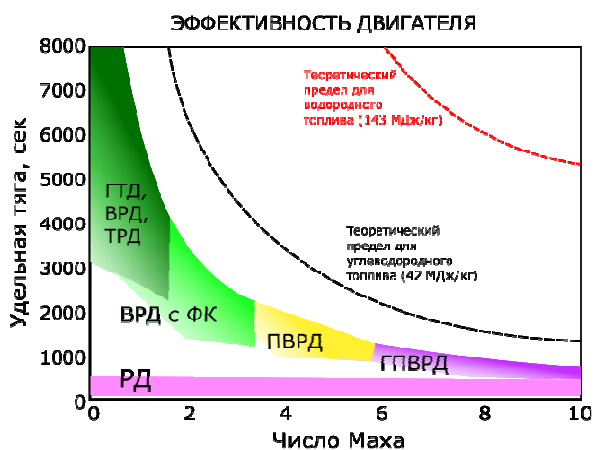
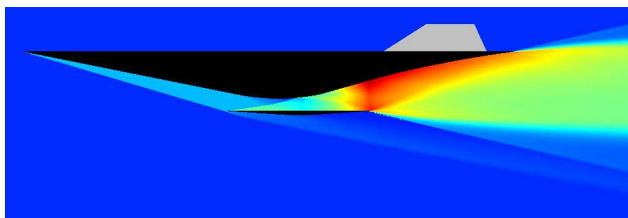
статическое давление. Из этого следует, что термический КПД ПВРД возрастает с ростом скорости движения самолёта.

Конструкция ПВРД для дозвуковых и сверхзвуковых скоростей должна быть различной. В дозвуковом ПВРД торможение потока происходит при течении в расширяющемся диффузоре, а ускорение потока - при течении в суживающемся сопле. ПВРД для сверхзвуковых скоростей полета должен быть снабжен суживающимся участком, в котором сверхзвуковой поток тормозится до звуковой скорости, а затем происходит его дальнейшее торможение в расширяющемся дозвуковом диффузоре.

## 6. ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ГПВРД)

Гиперзвуковой прямоточный воздушный реактивный двигатель является разновидностью бескомпрессорных ВРД. Отличительной особенностью такого двигателя является высокая тяга на больших сверхзвуковых скоростях полёта и горение топлива при сверхзвуковой скорости течения окислителя. Достижение гиперзвуковой скорости даёт возможность осуществлять суборбитальные полёты с использованием воздуха в качестве окислителя, что может существенно удешевить доставку грузов на околоземную орбиту.

Высокое давление и температура за скачком уплотнения, формирующимся на нижней стенке корпуса гиперзвукового летательного аппарата, позволяет отказаться от системы поджига топлива и, более того, делает наличие воздухозаборника необязательным элементом двигателя. В современных проекта ГПВРД используется углеводородное топливо, однако в перспективных проектах в качестве топлива планируется использовать водород. Как следует из графика, теоретически, удельный импульс двигателя, работающего на чистом водороде, в три раза выше, чем двигателя, работающего на углеводородном топливе.



При всём разнообразии конструкций авиационных и автомобильных двигателей можно заметить, что с точки зрения термодинамики все эти двигатели работают одинаково. Более того в каждом из них совершается термодинамический цикл состоящий из двух изобар и двух адиабат, а КПД двигателя возрастает с ростом максимального давления в цикле.

## 7. ЧТО ОБЩЕГО У ВАШЕЙ МАШИНЫ С ГИПЕРЗВУКОВЫМ САМОЛЁТОМ БУДУЩЕГО?

1. Все рассмотренные двигатели работают на основе кругового термодинамического процесса - термодинамического цикла.

2. Возможные изменения давления, температуры, плотности воздуха и продуктов сгорания в термодинамических процессах определяются законами термодинамики, которые в равной степени справедливы и для двигателя автомобиля и для гиперзвукового двигателя самолёта.

3. Независимо от конструкции двигателя часть тепла, полученного при сгорании топлива, необходимо сбросить в окружающее пространство. В противном случае работа такого двигателя будет равна нулю.

4. Термодинамический цикл всех распространённых авиационных воздушно-реактивных двигателей и автомобильного дизельного двигателя - это цикл с подводом теплоты при постоянном давлении.

5. Для всех ВРД цикл содержит два изобарных и два адиабатных процесса. Как и для цикла Дизеля, КПД цикла Брайтона возрастает с увеличением максимального давления топливно-воздушной смеси.

Предлагаю вам расширить этот список самостоятельно.