

**ВТОРОЙ ЗАКОН  
ТЕРМОДИНАМИКИ. ПРИНЦИП  
ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ МАШИН.  
КПД. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ И  
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.**

---

- 
- **Цель занятия:** *знать второй закон термодинамики, принцип работы теплового двигателя.*
  - *Уметь приводить примеры тепловых двигателей и определять КПД. Иметь представление о проблемах энергетики и охране окружающей среды.*

## **План занятия:**

---

1 Второй закон термодинамики

2 Тепловые двигатели

3 Идеальный тепловой двигатель. Цикл Карно

4 КПД тепловых двигателей.

5 Проблемы энергетики и охрана окружающей среды.

6 Тест на тему: «Тепловые двигатели»

## 1 Второй закон термодинамики:

**Формулировка Кельвина:** невозможен круговой процесс (процесс, при котором система пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное) , единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу.

**Формулировка Клаузиуса:** невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.

---

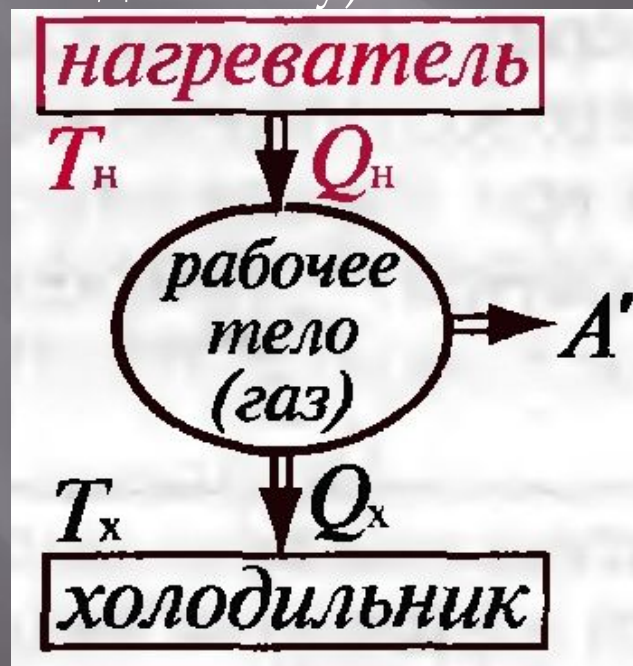
**Второй закон термодинамики  
отражает необратимость  
процессов в природе.**

## 2 Тепловые двигатели

Тепловой двигатель – устройство, превращающее внутреннюю энергию топлива в механическую работу.



При сгорании в нагревателе выделяется энергия, которая передаётся рабочему телу (газу)  $Q_H$  (энергия топлива превращается во внутреннюю энергию газа (пара)). Газ расширяется и совершает механическую работу ( $A'$ ). Чтобы двигатель работал циклически, газ необходимо сжать до исходного состояния. Для уменьшения работы над газом при сжатии его охлаждают, используя холодильник (передают тепло  $Q_X$  холодильнику).



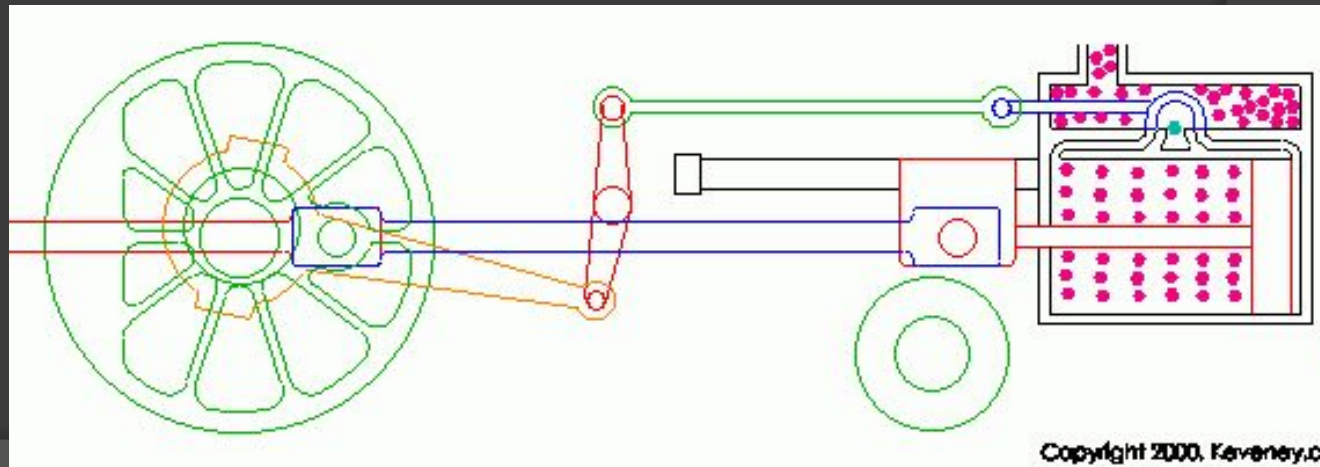
# Виды тепловых двигателей:

- Паровая машина;
- Паровая и газовая турбины;
- двигатель внутреннего сгорания;
- реактивный двигатель.



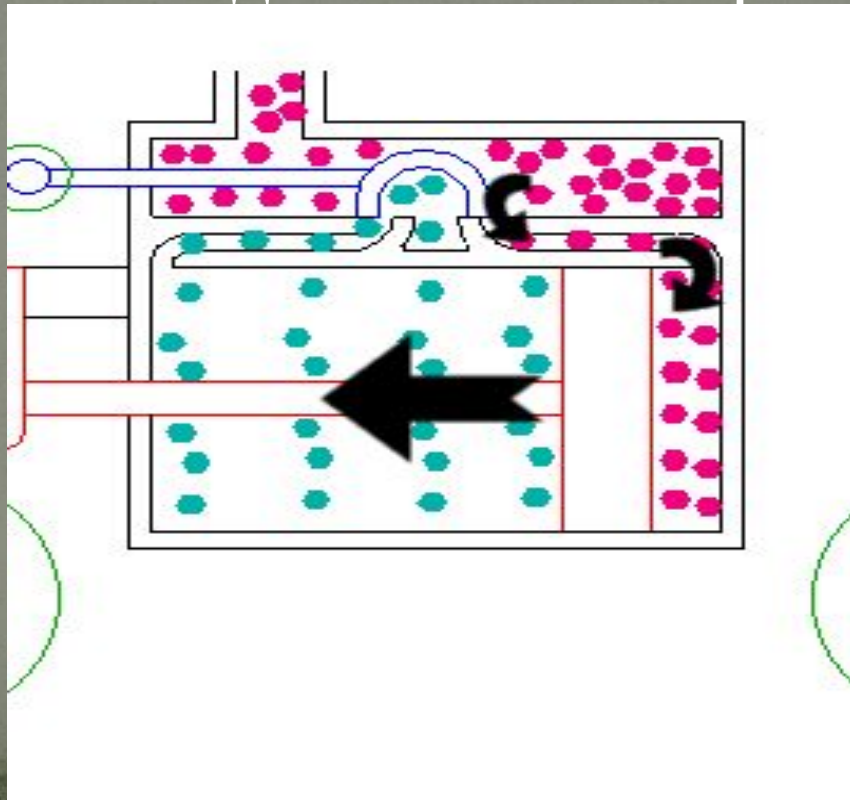
**Паровая машина** — тепловой двигатель внешнего сгорания, преобразующий энергию нагретого пара в механическую работу возвратно-поступательного движения поршня, а затем во вращательное движение вала. В более широком смысле паровая машина — любой двигатель внешнего сгорания, который преобразовывает энергию пара в механическую работу. Для генерации подаваемого на двигатель пара использовались котлы, работающие

как на дровах и угле, так и на жидком топливе.



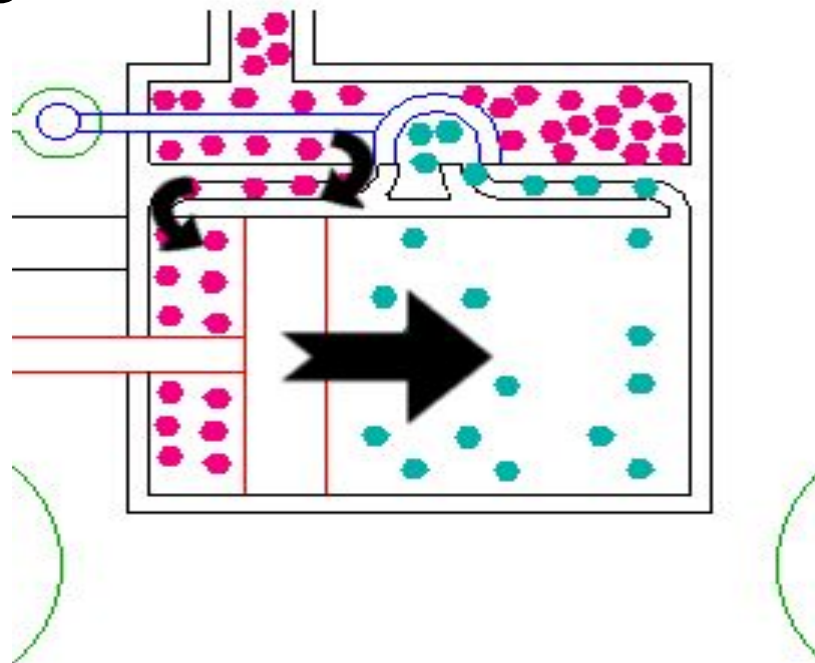
## Первый такт

Пар из котла поступает в паровую камеру, из которой через паровую задвижку-клапан (обозначена синим цветом) попадает в верхнюю (переднюю) часть цилиндра. Давление, создаваемое паром, толкает поршень вниз к НМТ. Во время движения поршня от ВМТ к НМТ колесо делает пол оборота.



## Второй такт

В то же самое время, смещение клапана на выпуск остатков пара открывает вход пара в нижнюю (заднюю) часть цилиндра. Созданное паром в цилиндре давление заставляет поршень двигаться к ВМТ. В это время колесс рота.

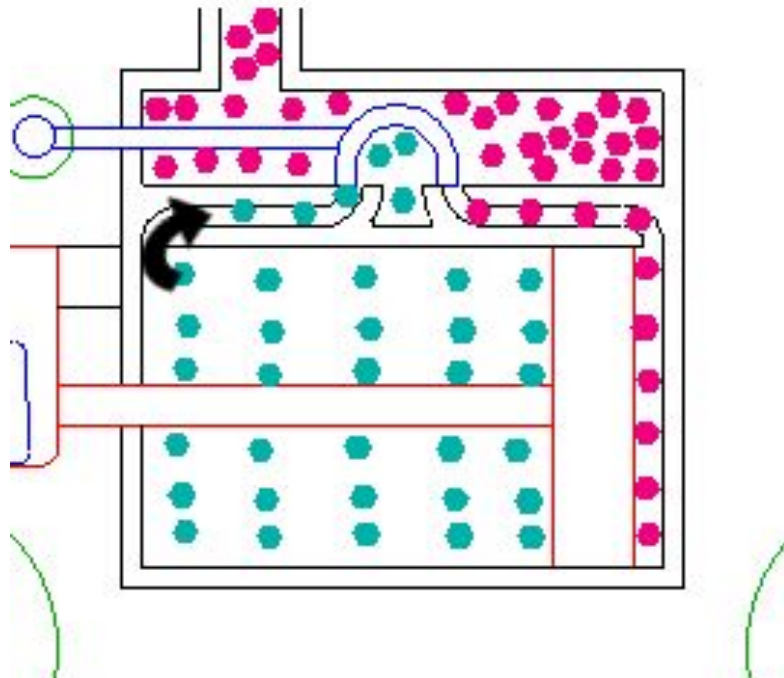


# Выпуск

В конце движения поршня к ВМТ остатки пара освобождаются через все то же выпускное окно.

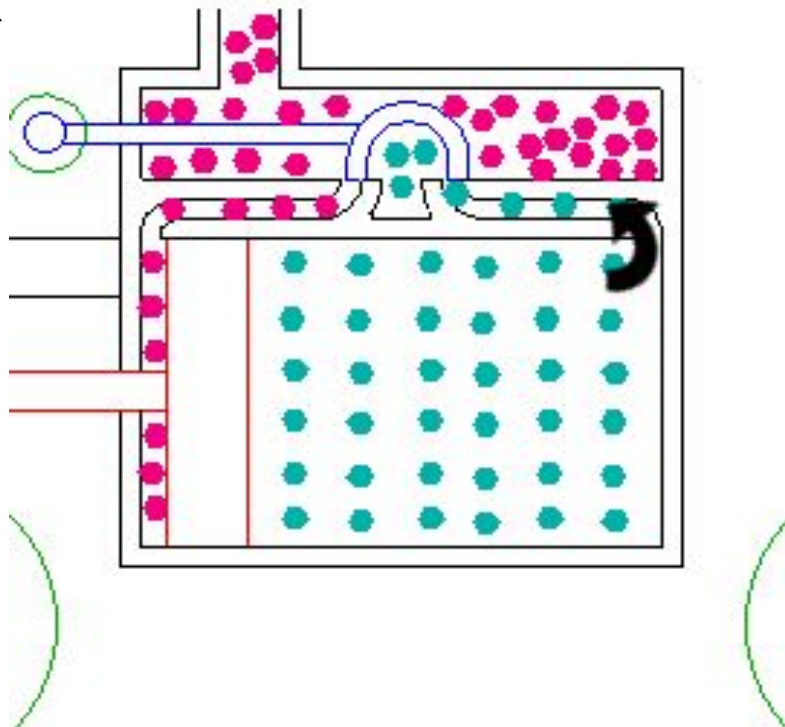
Цикл повторяется заново.

Паровой двигатель имеет т.н. мертвую точку в конце каждого хода, когда клапан переходит от такта расширения к выпуску. По этой причине каждый паровой двигатель имеет два цилиндра, что позволяет запускать двигатель из любого положения.



# Выпуск

В самом конце движения поршня к НМТ паровой клапан смещается, выпуская остатки пара через выпускное окно, расположенное ниже клапана. Остатки пара вырываются наружу, создавая характерный для работы паровых

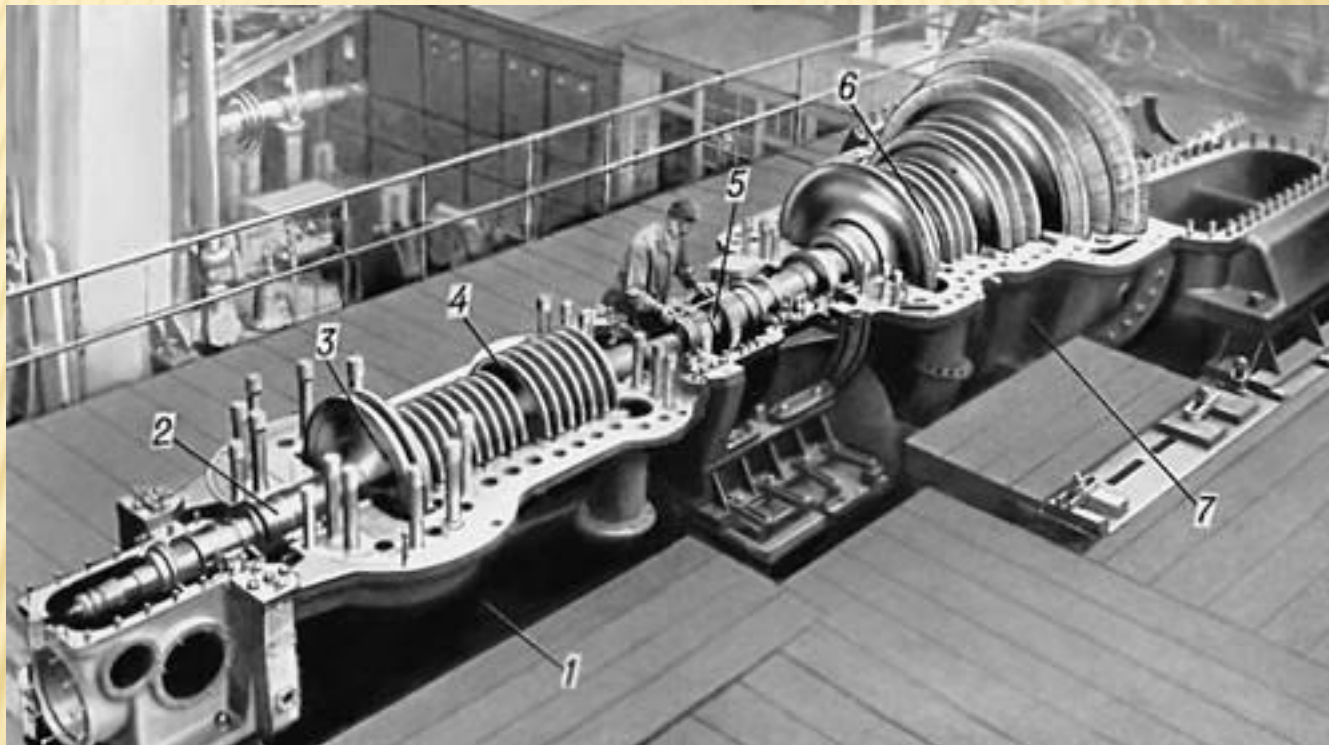


# ПАРОВАЯ ТУРБИНА

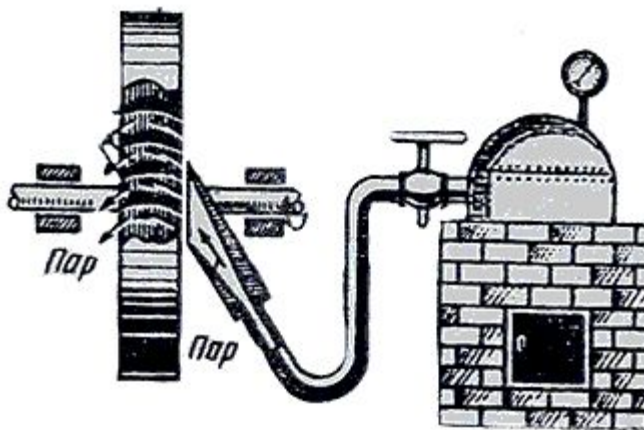
- ОДИН ИЗ ВИДОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, В КОТОРЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР ИЛИ ДРУГОЙ ГАЗ ВРАЩАЮТ ВАЛ БЕЗ ПОМОЩИ ПОРШНЯ. СТРУИ ПАРА, ВЫРЫВАЯСЬ ИЗ СОПЕЛ, ДАВЯТ НА ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ И ВРАЩАЮТ ЕЁ.



# ДВУХКОРПУСНАЯ ПАРОВАЯ ТУРБИНА



Одной из первых турбин была паровая турбина, созданная в конце 19 века шведским инженером Лавалем. Она нашла широкое применение благодаря новой прогрессивной конструкции сопла.





Паровая тяга всё еще обеспечивает большую часть необходимой нам энергии. Даже лучшие из современных атомных реакторов – всего лишь источники тепла, превращающие воду в пар для вращения турбин, соединённых с электрогенераторами.

Первая паровая турбина была изобретена в 1 в. н.э. греческим инженером Геро Александрийским. Но первая паровая машина, нашедшее практическое применение, была создана в 1698 году Томасом Сэвери. Она использовалась для откачивания воды из угольных шахт.

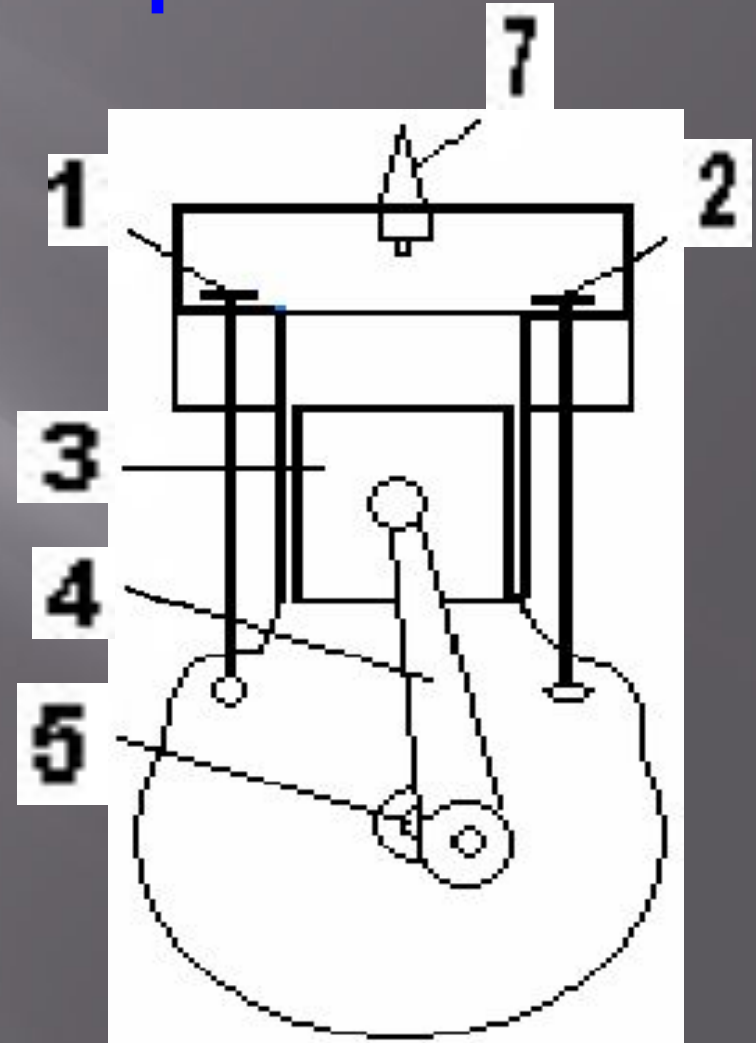
# ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

---

- ▣ **Двигателем внутреннего сгорания называется тепловая машина, в которой в качестве рабочего тела используются газы высокой температуры, образующиеся при сгорании жидкого или газообразного топлива непосредственно внутри камеры поршневого двигателя.**

# Разрез простейшего двигателя внутреннего сгорания.

- ▣ 1,2-клапаны.
- ▣ 3-поршень.
- ▣ 4-шатун.
- ▣ 5-коленчатый вал.
- ▣ 6-маховик.
- ▣ 7-свеча.



# Первый такт. Всасывание

- Поршень движется вниз из крайнего верхнего положения и впускной клапан открыт. При опускании поршня через этот клапан в камеру сгорания всасывается горючая смесь – пары бензина с воздухом. В конце такта первый клапан закрывается, второй закрыт.



# Второй такт. Сжатие.

Поршень поднимается в верхнюю мёртвую точку, клапаны закрыты. Происходит сжатие рабочей смеси давлением до 12 Мпа.



# ТРЕТИЙ ТАКТ. РАБОЧИЙ ХОД.

- У газообразных продуктов сгорания температура достигает  $1600-1800^{\circ}\text{C}$ , а давление соответственно  $1-10\text{ МПа}$ . Эти газы с большой силой давят на поршень, который опускается вниз и с помощью шатуна и кривошипа приводит во вращение коленчатый вал.

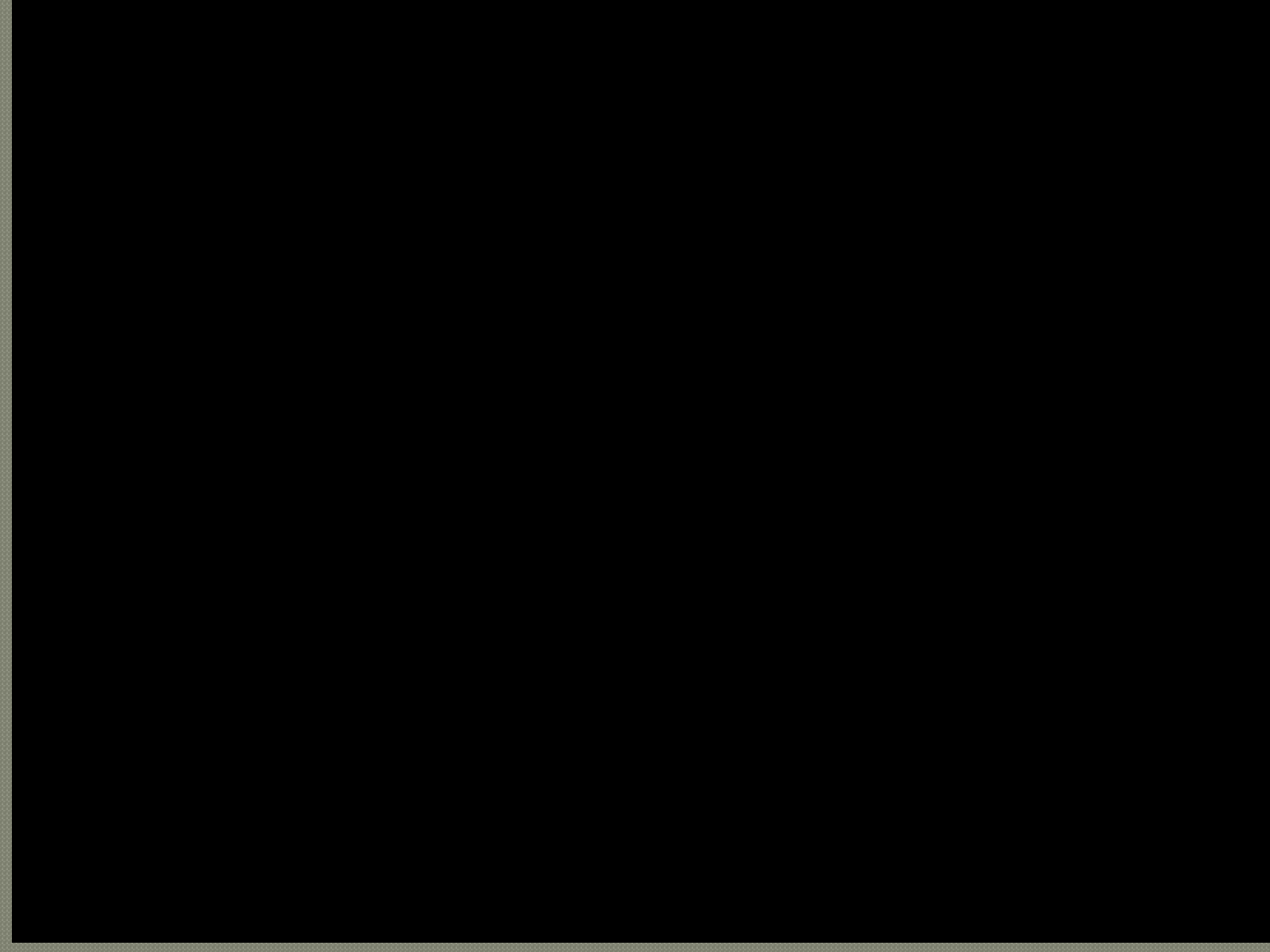


# Четвертый такт. Выхлоп.



- В конце рабочего хода , когда поршень приходит в крайнее нижнее положение, открывается выхлопной клапан. Поршень , поднимаясь вверх, выталкивает отработавшие газы в атмосферу. После этого начинается снова первый такт- всасывание горючей смеси.







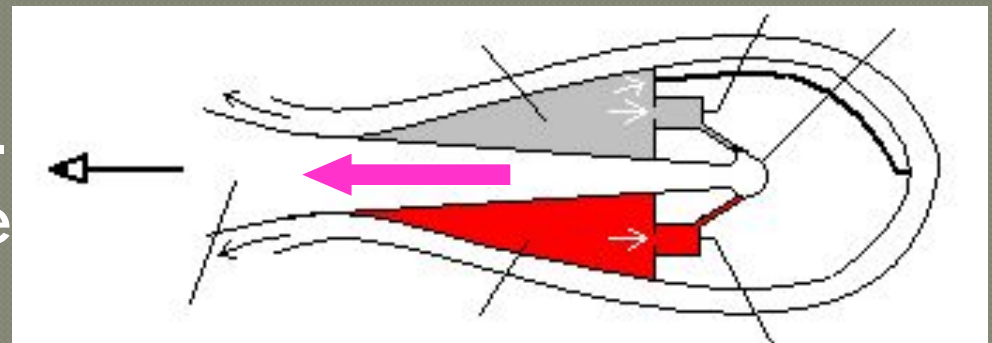
# Реактивные двигатели.

Впервые возможность и необходимость использования жидкостными ракетными двигателями для запуска человека в космическое пространство были обоснованы К. Э. Циолковским в 1903 году. Он предложил конструкцию ракеты, схема которой достаточно хорошо показана на рисунке.



# Жидкостные ракетные двигатели.

- 1- камера сгорания.
- 2- насосы.
- 3- выходное сопло.
- 4- жидкое горючее
- 5- окислитель.



5

2

1

3

4

2

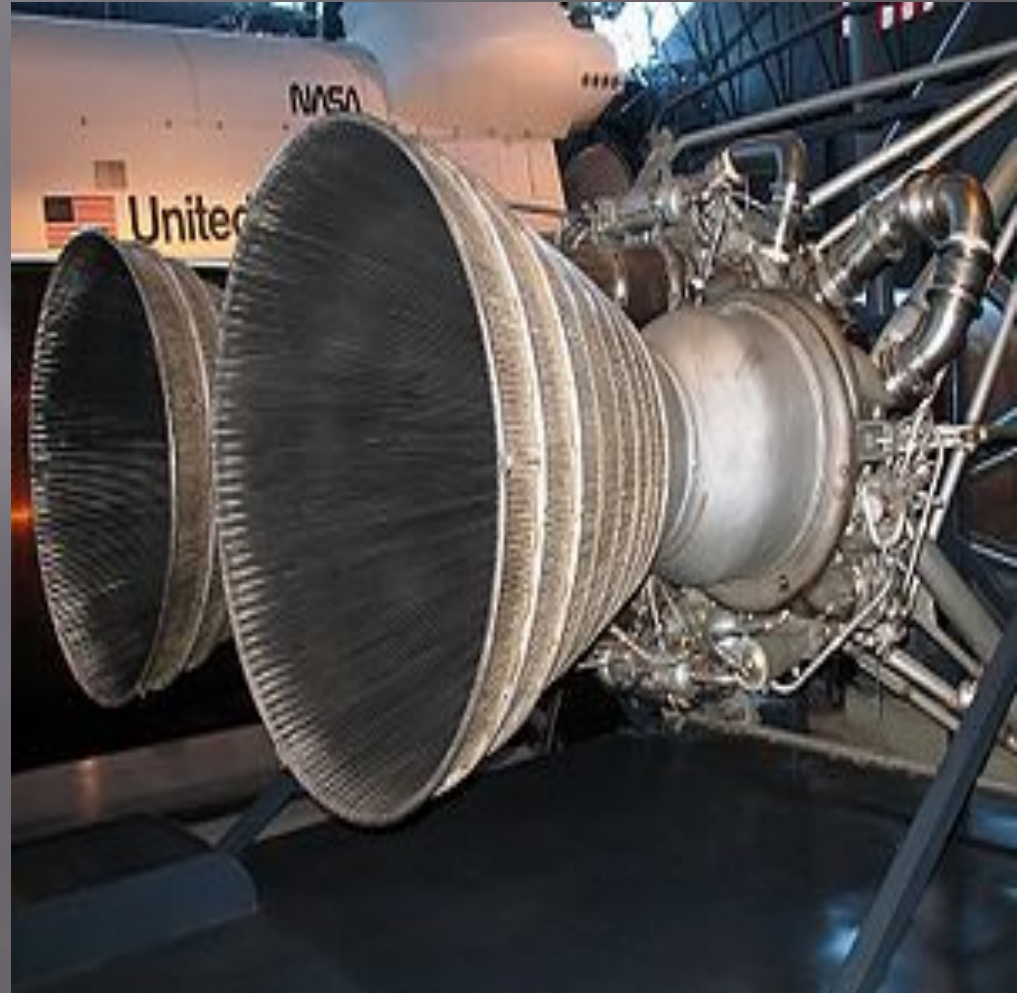
**Ракетный двигатель** — реактивный двигатель, источник энергии и рабочее тело которого находится в самом средстве передвижения. Ракетный двигатель — единственный практически освоенный для вывода полезной нагрузки на орбиту искусственного спутника Земли и применения в условиях безвоздушного космического пространства тип двигателя.

Сила тяги в ракетном двигателе возникает в результате преобразования исходной энергии в кинетическую энергию реактивной струи рабочего тела. В зависимости от вида энергии, преобразующейся в кинетическую энергию реактивной струи, различают *химические ракетные двигатели, ядерные ракетные двигатели и электрические ракетные двигатели.*

В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) горючее и окислитель пребывают в жидком агрегатном состоянии. Они подаются в камеру сгорания с помощью турбонасосной или вытеснительной системами подачи. Жидкостные ракетные двигатели допускают регулирование тяги в широких пределах, и многократное включение и выключение, что особенно важно при маневрировании в космическом пространстве. Удельный импульс ЖРД достигает 4500 м/с. Тяга — свыше 800 тс. По совокупности этих свойств ЖРД предпочтительны в качестве маршевых двигателей ракет-носителей космических аппаратов, и маневровых двигателей.

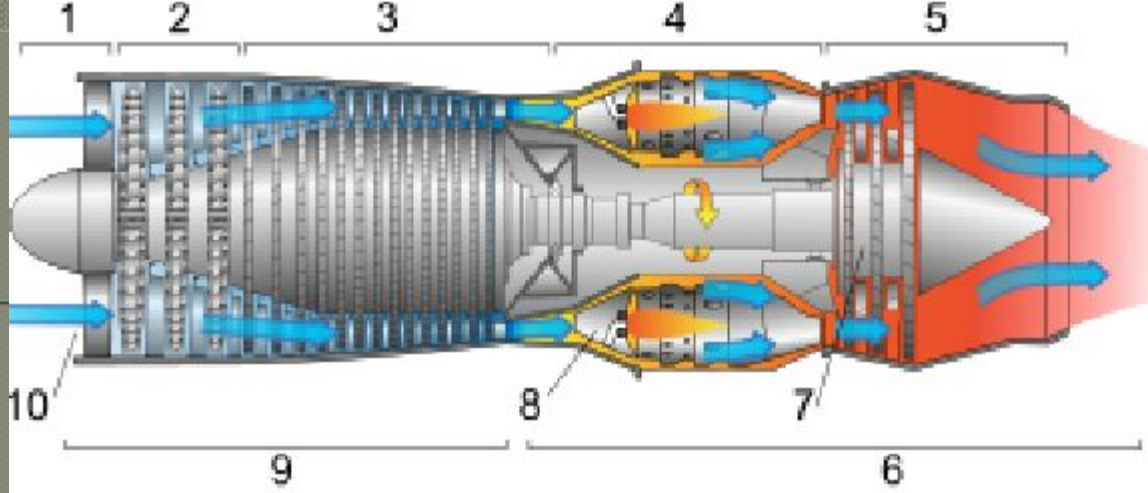
В качестве пары горючее + окислитель могут использоваться различные компоненты. В современных криогенных двигателях используется пара жидкий кислород + жидкий водород (наиболее эффективные компоненты для ЖРД). Другой группой компонентов являются самовоспламеняющиеся при контакте друг с другом, пример такой схемы — азотный тетраоксид + несимметричный диметилгидразин. Довольно часто применяется пара жидкий кислород + керосин. Существенно соотношение компонентов: на 1 часть горючего может подаваться от 1 части окислителя (топливная пара кислород + гидразин) до 5 и даже 19 частей окислителя (топливные пары азотная кислота + керосин и фтор + водород соответственно).

# Конструкция сопел





**Турбо реактивный двигатель** — двигатель, развивающий тягу за счёт реактивной струи рабочего тела, истекающего из сопла двигателя. С этой точки зрения ТРД подобен ракетному двигателю (РД), но отличается от последнего тем, что большую часть рабочего тела он забирает из окружающей среды — атмосферы, в том числе и окислитель, необходимый для горения топлива. В качестве окислителя в ТРД используется кислород, содержащийся в воздухе. Благодаря этому ТРД обладает преимуществом в сравнении с ракетным двигателем при полётах в атмосфере: если летательный аппарат, оборудованный ракетным двигателем должен транспортировать как горючее, так и окислитель, масса которого больше массы горючего в 2-8 раз, в зависимости от вида горючего, то аппарат, оснащённый ТРД должен иметь на борту только запас горючего. Следовательно, при одной и той же массе топлива аппарат с ТРД энергетически в несколько раз более обеспечен, чем аппарат с ракетным двигателем, и на активном участке полёта может преодолеть в несколько раз большее расстояние (иногда — в десятки раз)



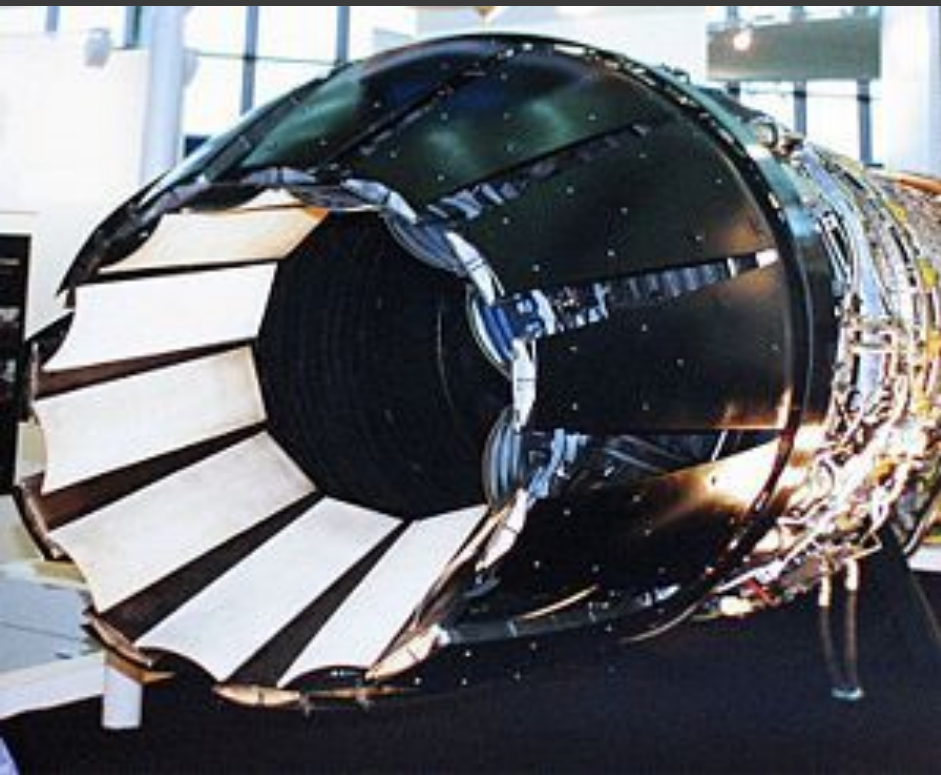
## Схема работы ТРД:

1. Забор воздуха;
2. Компрессор низкого давления;
3. Компрессор высокого давления;
4. Камера сгорания;
5. Расширение рабочего тела в турбине и сопле;
6. Горячая зона;
7. Турбина;
8. Зона входа первичного воздуха в камеру сгорания;
9. Холодная зона увеличение давления воздуха за счёт торможения воздушного потока. В компрессоре осуществляется рост полного давления воздуха за счёт совершаемой компрессором механической работы.



- Камера сгорания большинства ТРД имеет кольцевую форму и вал турбина-компрессор проходит внутри кольца камеры. При поступлении в камеру сгорания воздух разделяется на 3 потока.
- *Первичный воздух* — поступает через фронтальные отверстия в камере сгорания, тормозится перед форсунками и принимает непосредственное участие в формировании топливно-воздушной смеси. Непосредственно участвует в сгорании топлива. Топливо-воздушная смесь в зоне сгорания топлива в ВРД по своему составу близка к стехиометрической.
- *Вторичный воздух* — поступает через боковые отверстия в средней части стенок камеры сгорания и служит для их охлаждения путём создания потока воздуха с гораздо более низкой температурой, чем в зоне горения.
- *Третичный воздух* — поступает через специальные воздушные каналы в выходной части стенок камеры сгорания и служит для выравнивания поля температур рабочего тела перед турбиной.
- Из камеры сгорания нагретое рабочее тело поступает на турбину, расширяется, приводя её в движение и отдавая ей часть своей энергии, а после неё расширяется в сопле и истекает из него, создавая реактивную тягу.

# Регулируемые сопла



Благодаря компрессору ТРД может «трогать с места» и работать при низких скоростях полёта, что для двигателя самолёта является совершенно необходимым, при этом давление в тракте двигателя и расход воздуха обеспечиваются только за счёт компрессора.

При повышении скорости полёта давление в камере сгорания и расход рабочего тела растут за счёт роста напора встречного потока воздуха, который затормаживается во входном устройстве и поступает на вход низшего каскада компрессора под давлением более высоким, чем атмосферное, при этом повышается и тяга двигателя.

Диапазон скоростей, в котором ТРД эффективен, смещён в сторону меньших значений. Агрегат «турбина-компрессор», позволяющий создавать большой расход и высокую степень сжатия рабочего тела в области низких и средних скоростей полёта, является препятствием на пути повышения эффективности двигателя в зоне высоких скоростей:

- Температура, которую может выдерживать турбина, ограничена, что накладывает ограничение на количество тепловой энергии, подводимой к рабочему телу в камере сгорания, а это ведёт к уменьшению работы, производимой им при расширении.
- *Повышение допустимой температуры рабочего тела на входе в турбину является одним из главных направлений совершенствования ТРД. Если для первых ТРД эта температура едва достигала 1000 К, то в современных двигателях она приближается к 2000 К. Это обеспечивается как за счёт применения особо жаропрочных материалов, из которых изготавливаются лопатки и диски турбин, так и за счёт организации их охлаждения: воздух из средних ступеней компрессора подается на турбину и проходит сквозь сложные каналы внутри турбинных лопаток.*
- Турбина поглощает часть энергии рабочего тела перед поступлением его в сопло.

### 3 Идеальный тепловой двигатель

**Цикл Карно́** — идеальный термодинамический цикл. *Тепловая машина Карно*, работающая по этому циклу, обладает максимальным КПД из всех машин, у которых максимальная и минимальная температуры

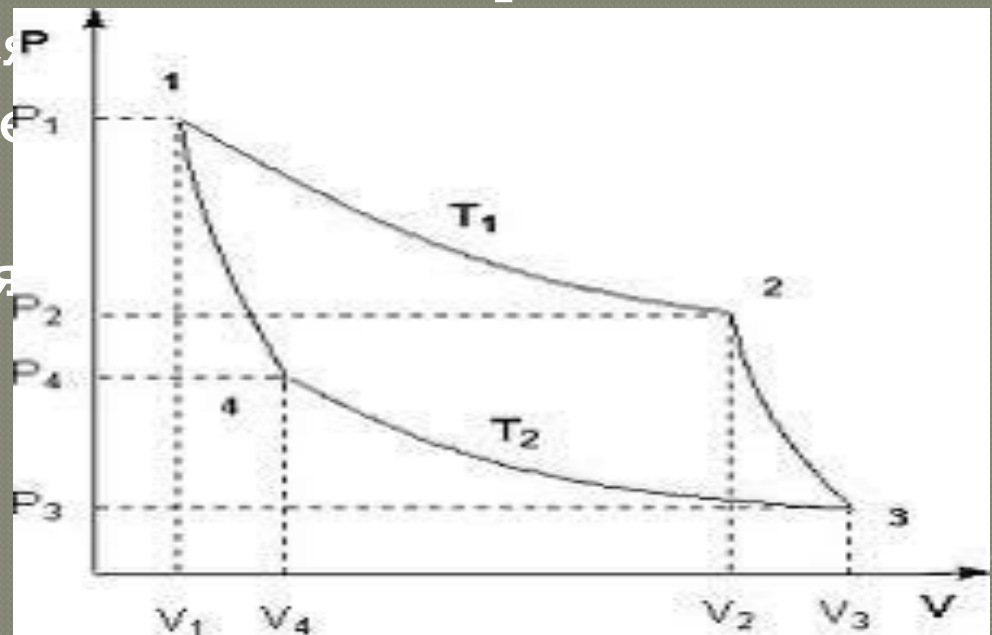
осуществляемого цикла совпадают соответственно с максимальной и минимальной температурами цикла Карно. Состоит из 2 адиабатических и 2 изотермических процессов. Цикл Карно назван в честь французского военного инженера Сади Карно, который впервые его исследовал в 1824 году.



**Цикл Карно** состоит из четырёх стадий:

**1. Изотермическое расширение** (на рисунке — процесс А>Б). В начале процесса рабочее тело имеет температуру  $T_H$ , то есть температуру нагревателя. Затем тело приводится в контакт с нагревателем, который изотермически (при постоянной температуре) передаёт ему количество теплоты  $Q_H$ . При этом объём рабочего тела увеличивается.

**2. Адиабатическое расширение** (на рисунке — процесс Б>В). Рабочее тело отсоединяется от нагревателя и продолжает расширяться без теплообмена с окружающей средой. При этом его температура уменьшается до температуры холодильника.

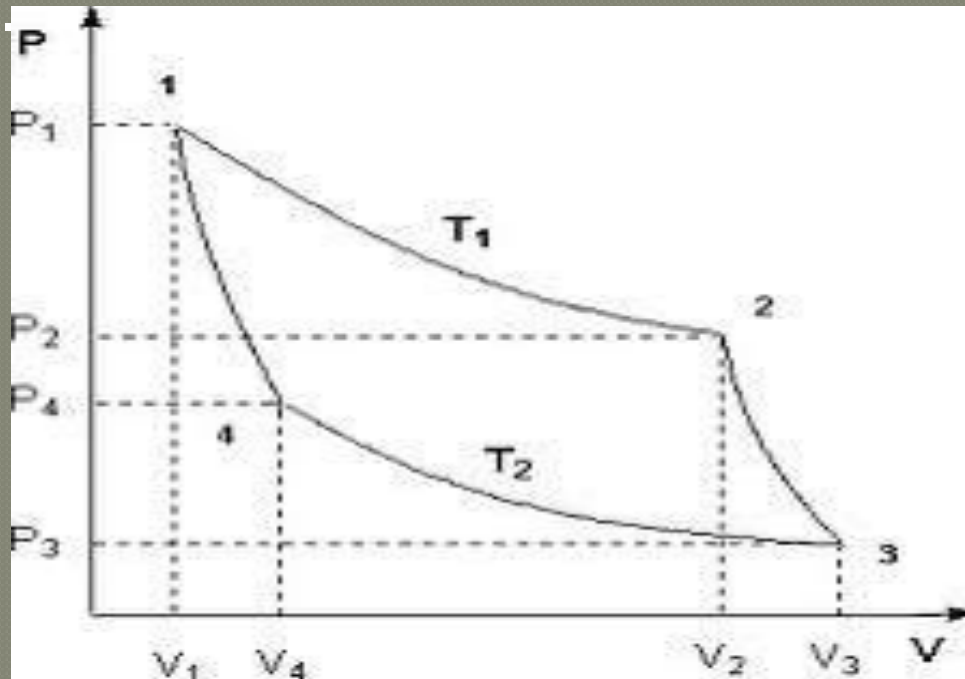


**3. Изотермическое сжатие** (на рисунке — процесс  $B > \Gamma$ ).

Рабочее тело, имеющее к тому времени температуру  $T_X$ , приводится в контакт с холодильником и начинает изотермически сжиматься, отдавая холодильнику количество теплоты  $Q_X$ .

**4. Адиабатическое сжатие** (на рисунке — процесс  $\Gamma > A$ ).

Рабочее тело отсоединяется от холодильника. При этом его температура увеличивается до температуры нагревателя.



- КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = \frac{T_H - T_X}{T_H}$$

- Отсюда видно, что КПД цикла Карно с идеальным газом зависит только от температуры нагревателя ( $T_H$ ) и холодильника ( $T_X$ ).
- Из уравнения следуют выводы:
- 1. Для повышения КПД тепловой машины нужно увеличить температуру нагревателя и уменьшить температуру холодильника;
- 2. КПД тепловой машины всегда меньше 1.



**4 Коэффициент полезного действия (КПД)** — характеристика эффективности системы (устройства, машины) в отношении преобразования или передачи энергии. Определяется отношением полезно использованной энергии к суммарному количеству энергии, полученному системой; обозначается обычно  $\eta$  («эта»).

$\eta = W_{\text{пол}} / W_{\text{сум}}$ . КПД является безразмерной величиной и часто измеряется в процентах. Математически определение КПД может быть записано в виде:

$$\eta = \frac{A}{Q}$$

где  $A$  — полезная работа, а  $Q$  — затраченная работа.

В силу закона сохранения энергии КПД всегда меньше единицы или равен ей, то есть невозможно получить полезной работы больше, чем затрачено энергии.

КПД теплового двигателя — отношение совершённой полезной работы двигателя, к энергии, полученной от нагревателя. КПД теплового двигателя можно выразить следующей

формуле

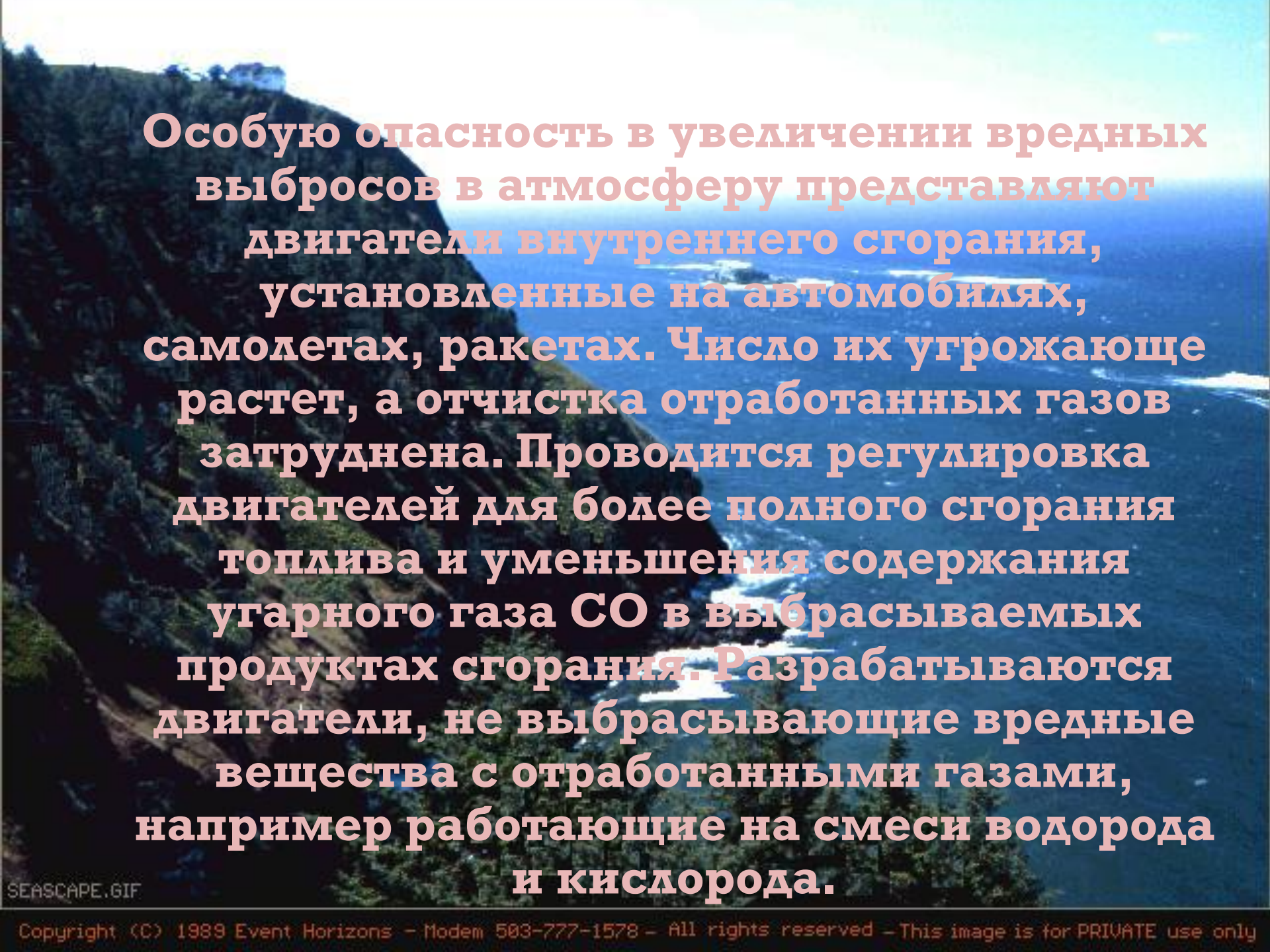
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

где  $Q_1$  — количество теплоты, полученное от нагревателя,  $Q_2$  — количество теплоты, отданное холодильнику. Наибольшим КПД обладают тепловые двигатели, работающие по

## 5 Проблемы энергетики и охрана окружающей среды.

- *Топки тепловых электростанций, двигатели внутреннего сгорания автомобилей, самолетов и других машин выбрасывают в атмосферу вредные для человека, животных и растений вещества, например сернистые соединения, оксиды азота, углеводороды, оксид углерода, хлор. Эти вещества попадают в атмосферу, а из нее - в различные части ландшафта.*





**Особую опасность в увеличении вредных выбросов в атмосферу представляют двигатели внутреннего сгорания, установленные на автомобилях, самолетах, ракетах. Число их угрожающе растет, а очистка отработанных газов затруднена. Проводится регулировка двигателей для более полного сгорания топлива и уменьшения содержания угарного газа СО в выбрасываемых продуктах сгорания. Разрабатываются двигатели, не выбрасывающие вредные вещества с отработанными газами, например работающие на смеси водорода и кислорода.**