

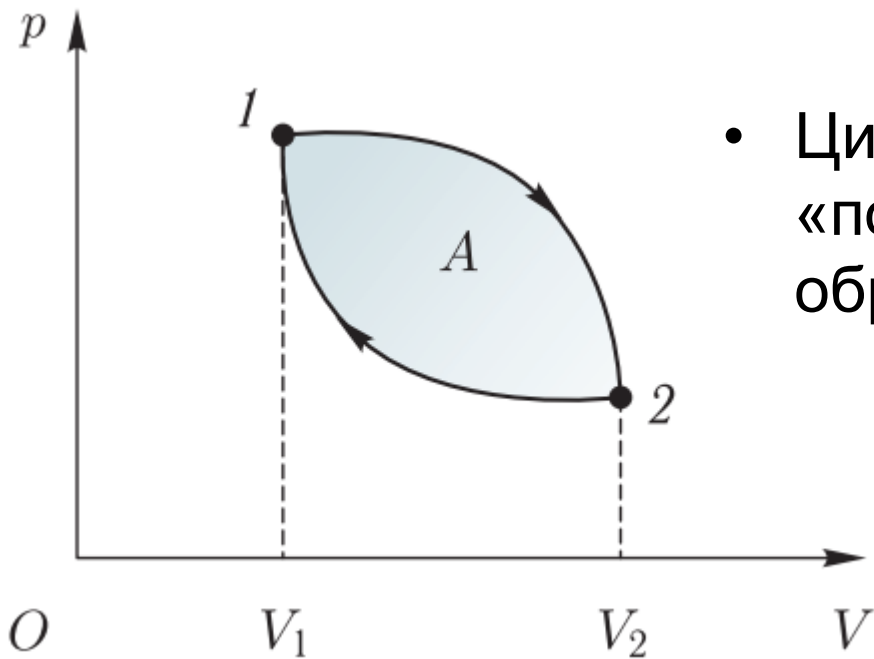
# Циклические процессы

- Циклические процессы.
- Тепловые машины. Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины.
- Принцип работы холодильной машины и теплового насоса.
- Двигатели внутреннего сгорания.
- КПД идеальной (обратимой) тепловой машины Карно.
- Использование цикла Карно для реализации термодинамической шкалы температур.
- Обратимые и необратимые процессы.
- Первая и вторая теоремы Карно.

# Циклические процессы

**Циклический процесс (круговой цикл)** – процесс, в результате которого термодинамическая система (рабочее вещество), изменяя свое состояние, в конце возвращается в исходное состояние.

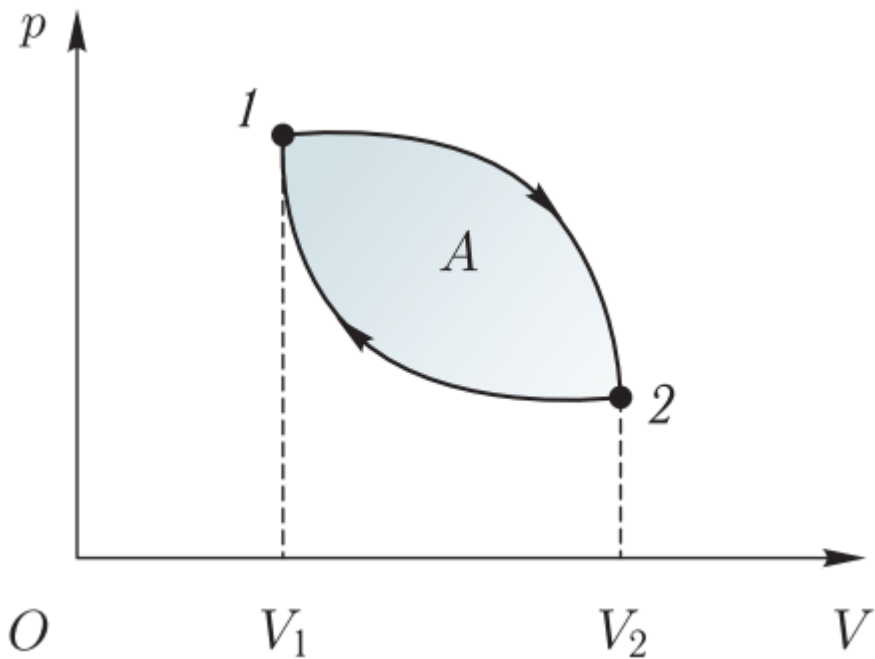
**Циклическим** называется процесс, начало и конец которого совпадают.



- Цикл может осуществляться как по «по часовой стрелке», так и в обратном направлении.

# Циклические процессы

**Обратимым процессом** – называется такое изменение состояния системы, которое, будучи проведено в обратном направлении, возвращается в исходное состояние так, что она проходит через те же состояния, что и в прямом процессе, но в обратной последовательности, а состояние окружающей систему среды при этом остается неизменным.



# Циклические процессы

Работа, осуществляемая системой за цикл, равна

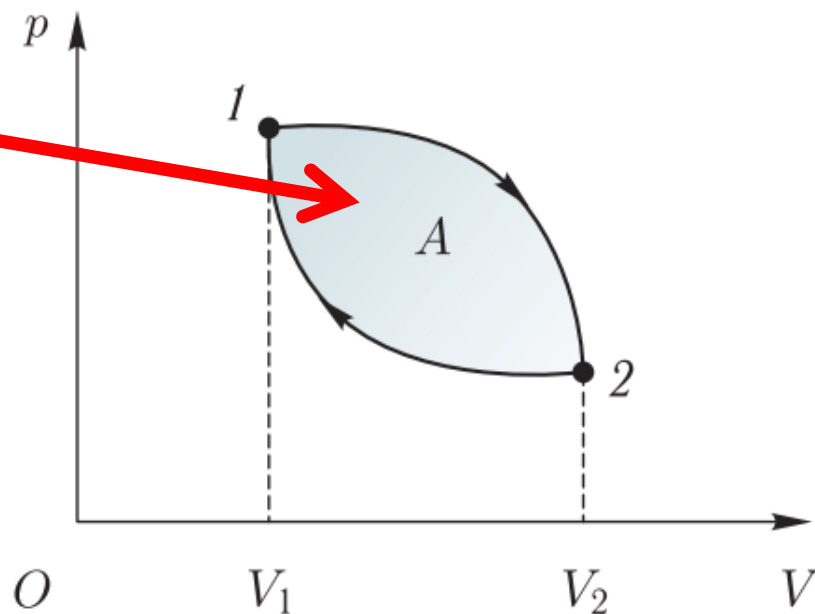
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV + \int_{V_2}^{V_1} p dV = \oint p dV$$

Поскольку внутренняя энергия при циклическом процессе возвращается, как функция состояния, к первоначальному значению, то

$$\oint dU = 0$$

При теплообмене с термостатами количество теплоты можно записать в виде

$$\oint \delta Q = Q^+ + Q^-$$



# Циклические процессы

В термодинамике **термостатом** называют большую термодинамическую систему, теплоемкость которой столь велика, что подводимые к ней количества теплоты при взаимодействии с исследуемым телом не изменяют ее температуру.

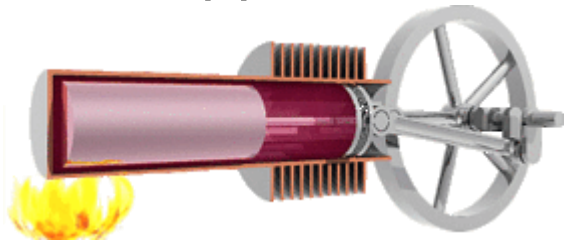
- Согласно первому началу термодинамики для обратимых процессов:

$$\oint \delta Q = \oint \delta A$$

- Это означает, что вся работа, совершенная за цикл, получается за счет количества теплоты, которое поступило в систему.
- Система, превращающая теплоту в работу, является **тепловой машиной**.

# Типы тепловых машин

- Тепловой двигатель



- Холодильная установка



- Тепловой насос



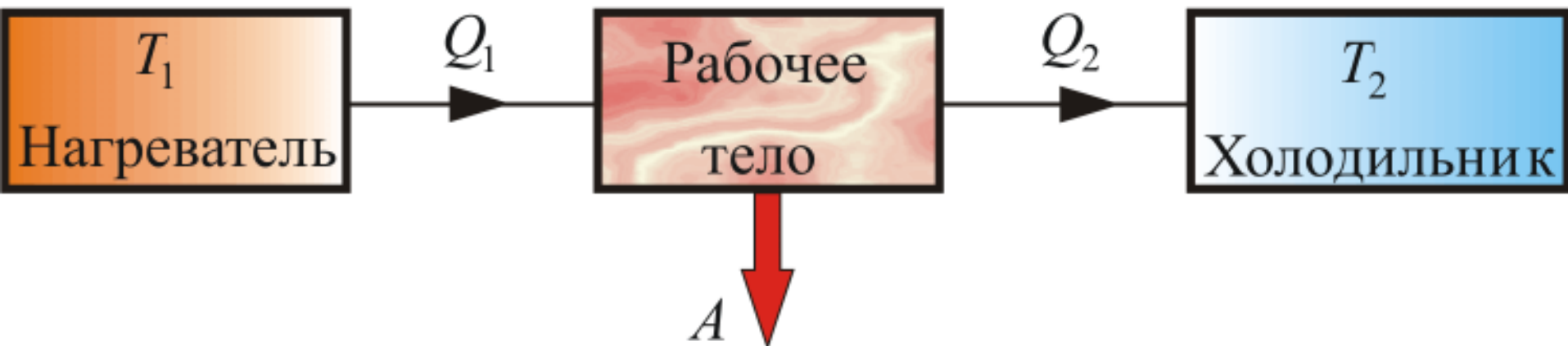
# Коэффициент полезного действия

Эффективность теплового двигателя характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД), определяемым как

$$\eta = \frac{A}{Q^+} = 1 - \frac{Q^-}{Q^+}$$

Возникает принципиальный вопрос: можно ли достичь величины  $\eta=1$ ?

Ответ на этот вопрос дает второе начало термодинамики.

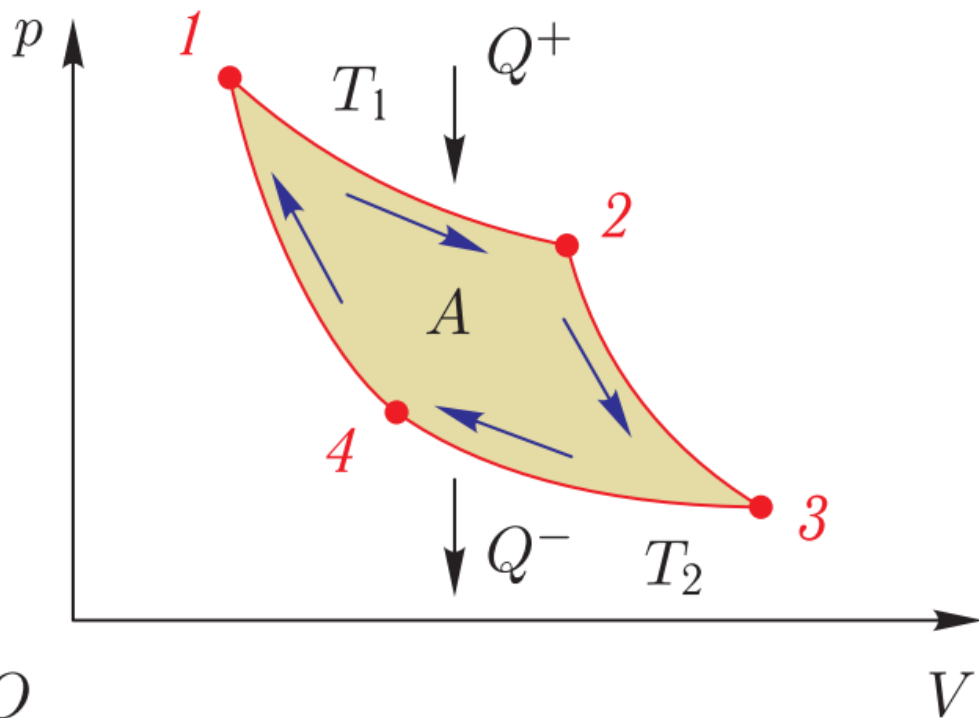


# Цикл Карно

Французский физик С. Карно, базирясь на представлении о теплороде, произвел анализ существовавших в то время тепловых машин и в 1824 г. опубликовал единственную свою работу, названную им «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

В ней им были выведены условия, при которых КПД достигает максимального значения (в паровых машинах того времени КПД не превышал 2 %). Помимо этого, там же были введены важные понятия термодинамики: *идеальная тепловая машина, идеальный цикл, обратимость и необратимость термодинамических процессов* и др.

# Цикл Карно



Четыре этапа работы идеальной машины, работающей по циклу Карно.

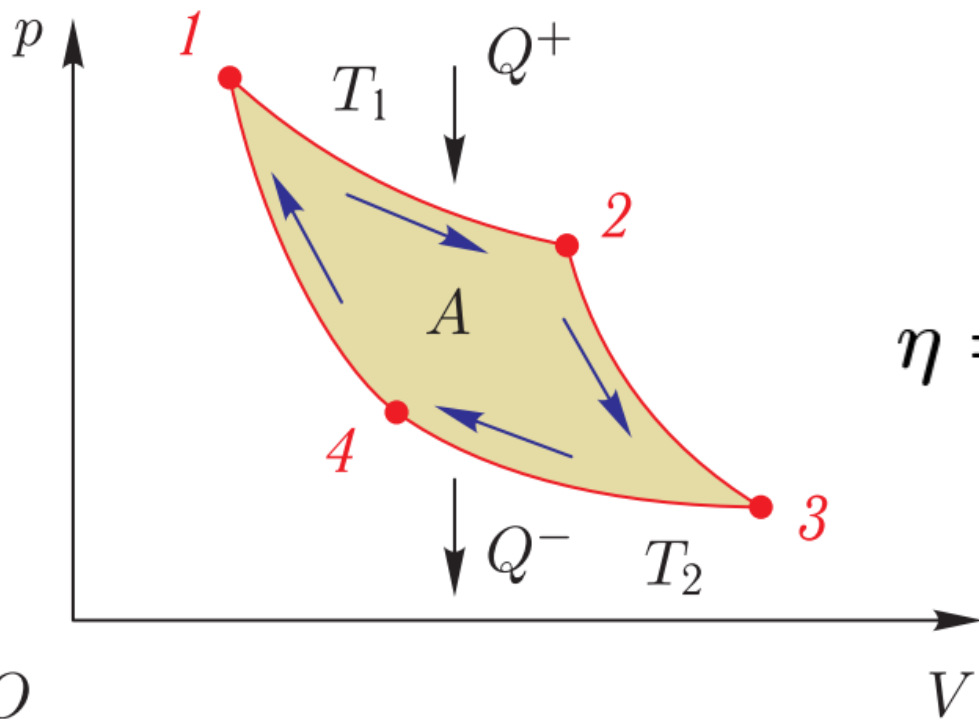
**1-2** изотермическое расширение рабочего тела при температуре  $T_1$ , которое получает теплоту  $Q^+$  от нагревателя.

**2-3** адиабатическое расширение в конце которого рабочее тело охлаждается до температуры холодильника  $T_2$ .

**3-4** изотермическое сжатие, при котором теплота  $Q^-$  отнимается и передается холодильнику.

**4-1** адиабатическое сжатие, при котором температура рабочего тела увеличивается до температуры нагревателя  $T_1$ .

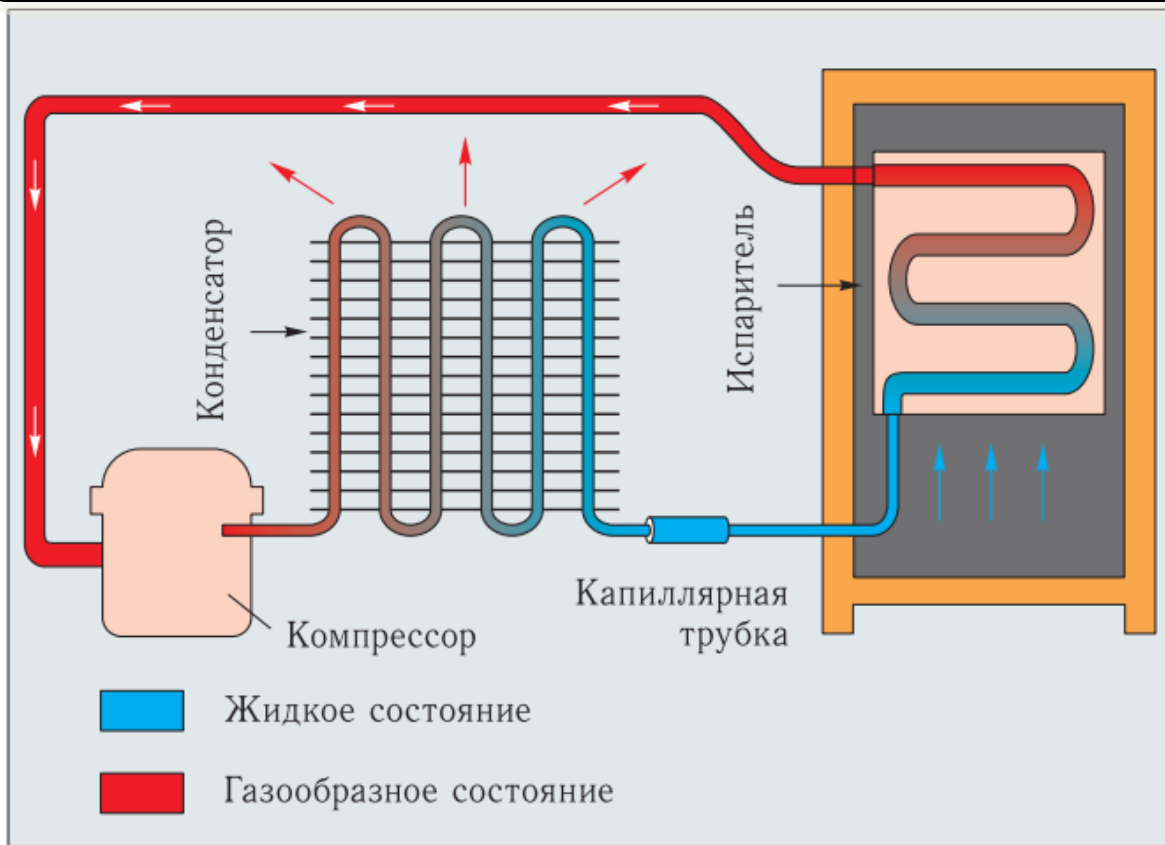
# Цикл Карно



$$\eta = 1 + \frac{Q^-}{Q^+} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

- **КПД** любой обратимой машины Карно определяется формулой и не зависит от вида рабочего тела и конструкции машины.

# Принцип действия холодильной машины



Холодильный коэффициент

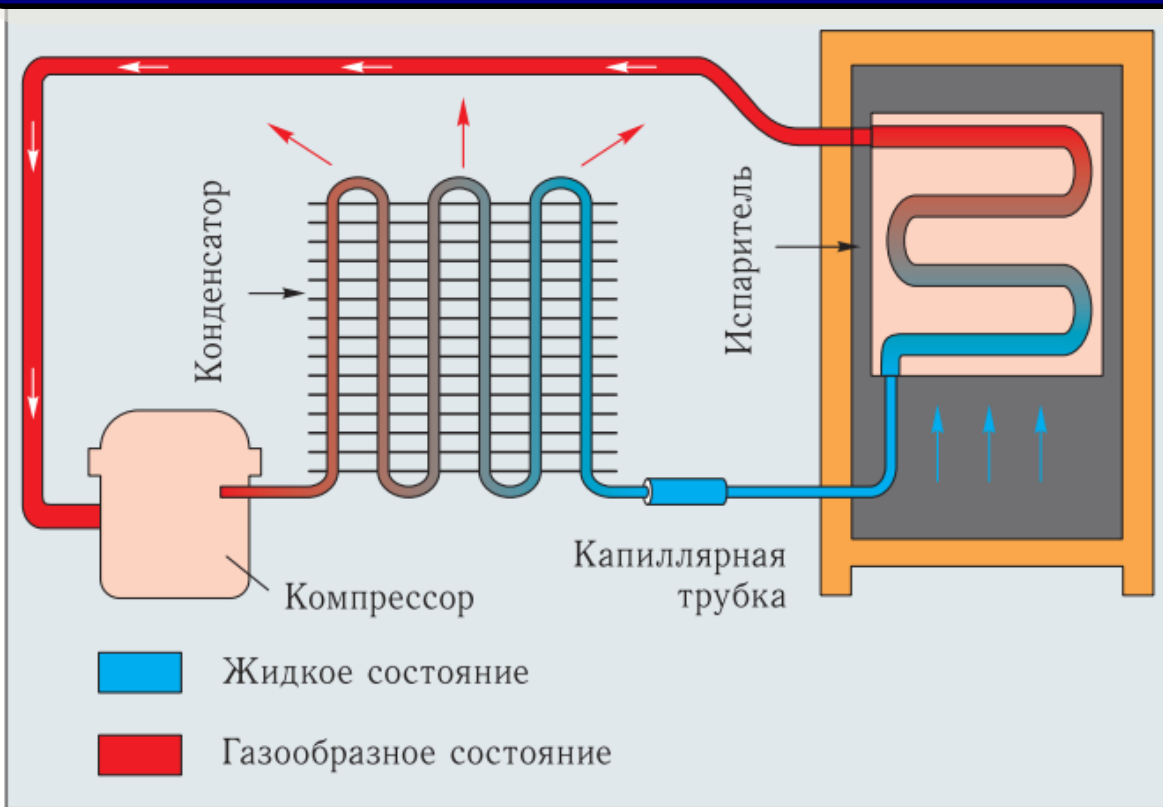
$$\eta_X = \frac{|Q^-|}{A_{ВН}} =$$

$$= \frac{|Q^-|}{Q^+ - |Q^-|} =$$

$$= \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

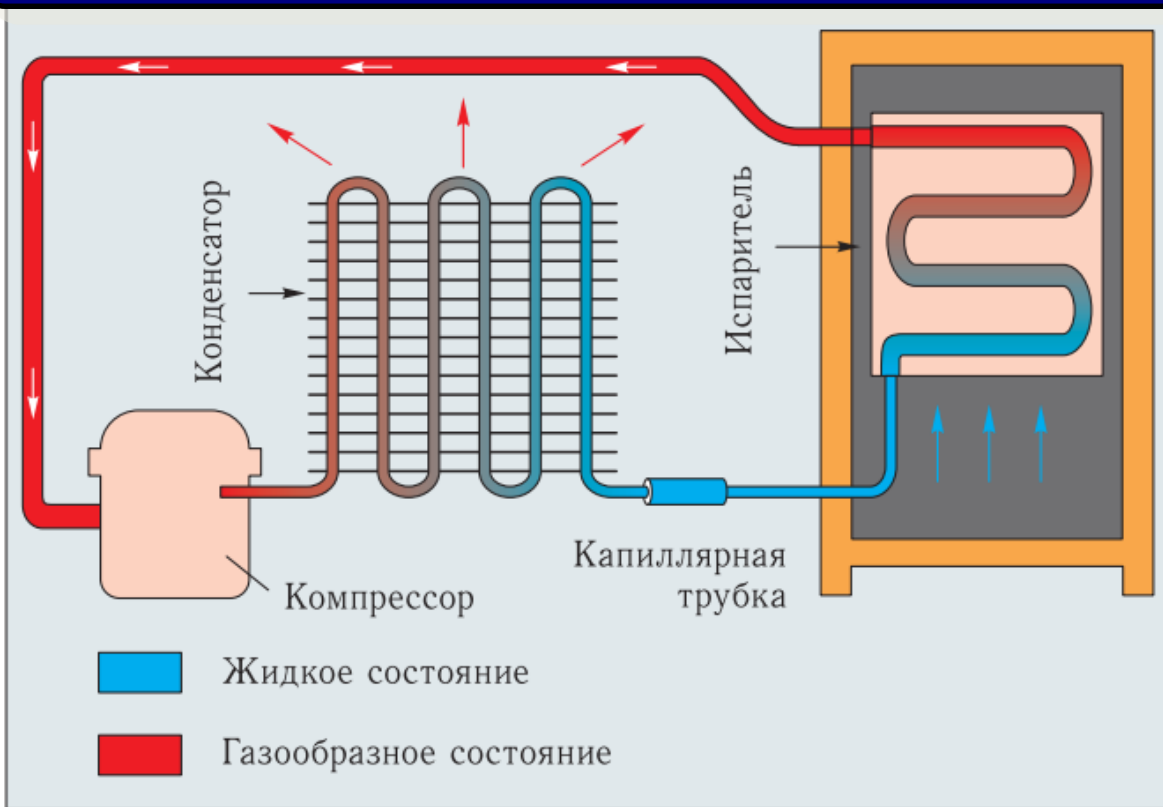
Цикл Карно, осуществляемый в обратном направлении (против часовой стрелки) является циклом, на основе которого могут функционировать холодильные установки и тепловые насосы.

# Принцип действия холодильной машины



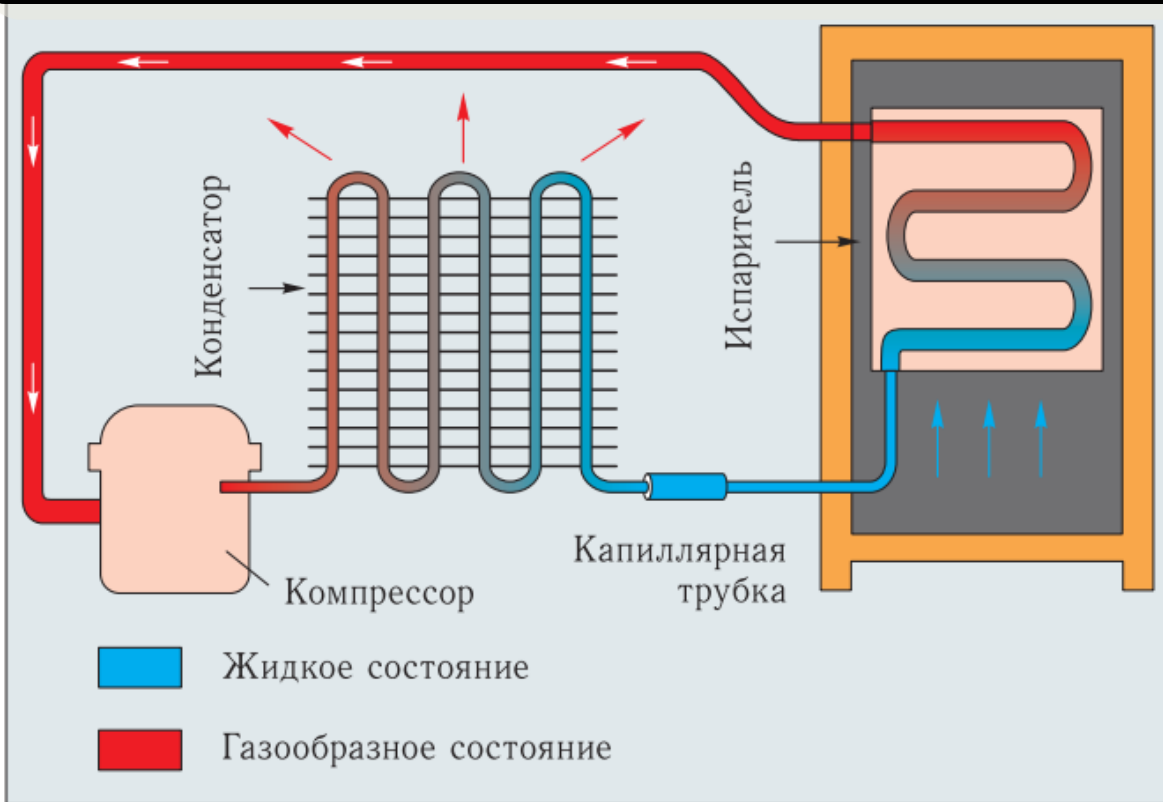
**Компрессор** засасывает из испарителя холодные пары хладагента и, сжав их, выталкивает в **конденсатор**. При этом температура сжатого пара увеличивается. **Хладагент** — вещество, переносящее теплоту от испарителя к конденсатору.

# Принцип действия холодильной машины



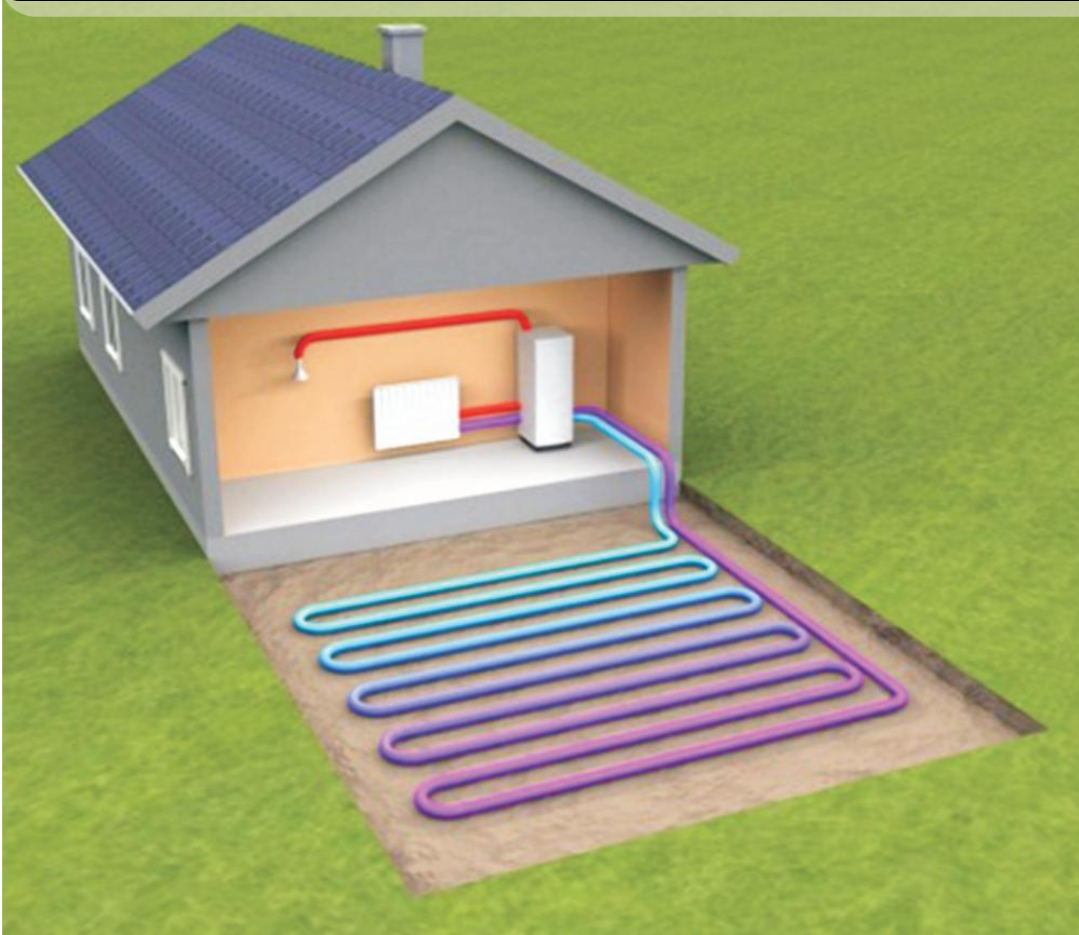
В конденсаторе пары остывают, и пар превращается в жидкость. Остывший жидкий хладагент под давлением через дросселирующее отверстие (капилляр) поступает в **испаритель**, где за счет резкого уменьшения давления происходит испарение жидкости.

# Принцип действия холодильной машины



Температура пара резко падает, стенки испарителя охлаждаются и происходит охлаждение внутреннего пространства холодильника.

# Тепловой насос

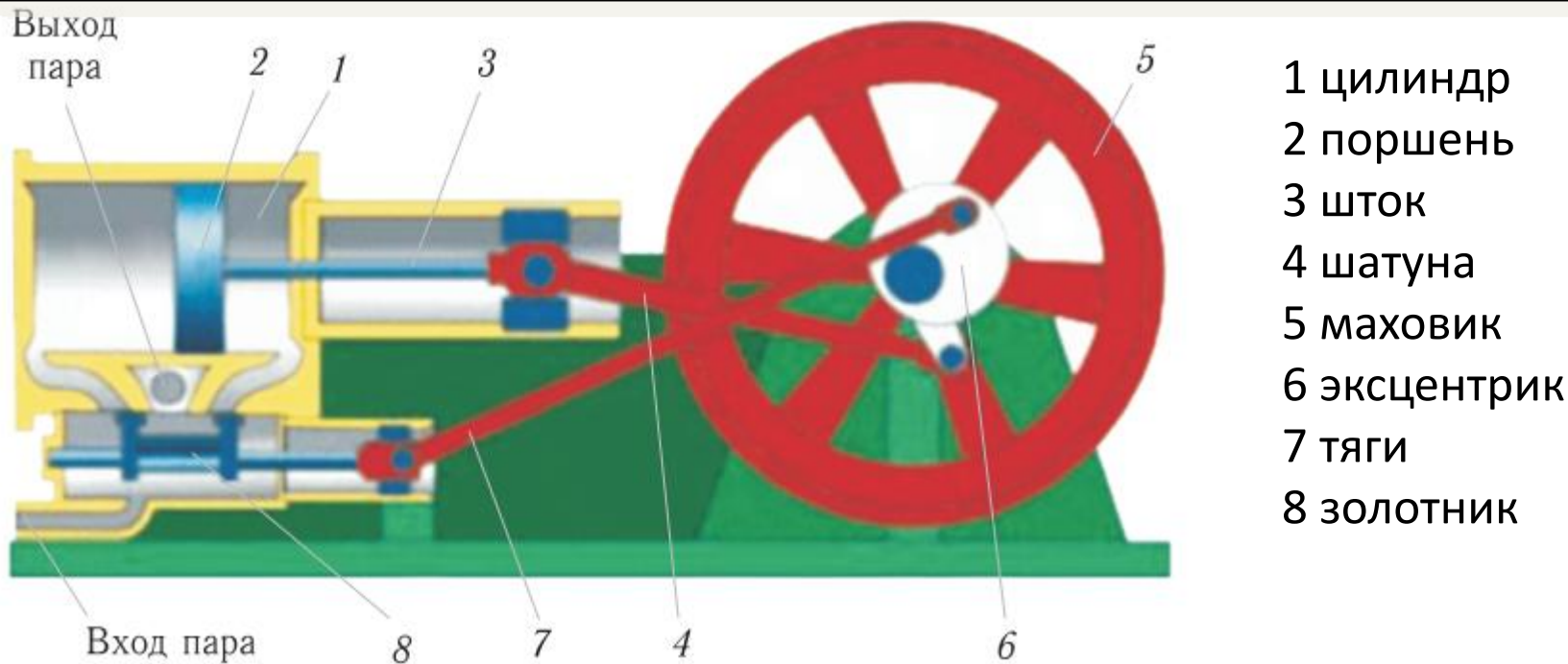


Эффективность тепловых насосов принято характеризовать величиной коэффициента трансформации энергии  $\eta_{\text{ТР}}$ , определяемого для обратимого цикла Карно по формуле:

$$\eta_{\text{ТР}} = \frac{|Q^+|}{A_{\text{ВН}}} = \frac{|Q^+|}{Q^+ - |Q^-|} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

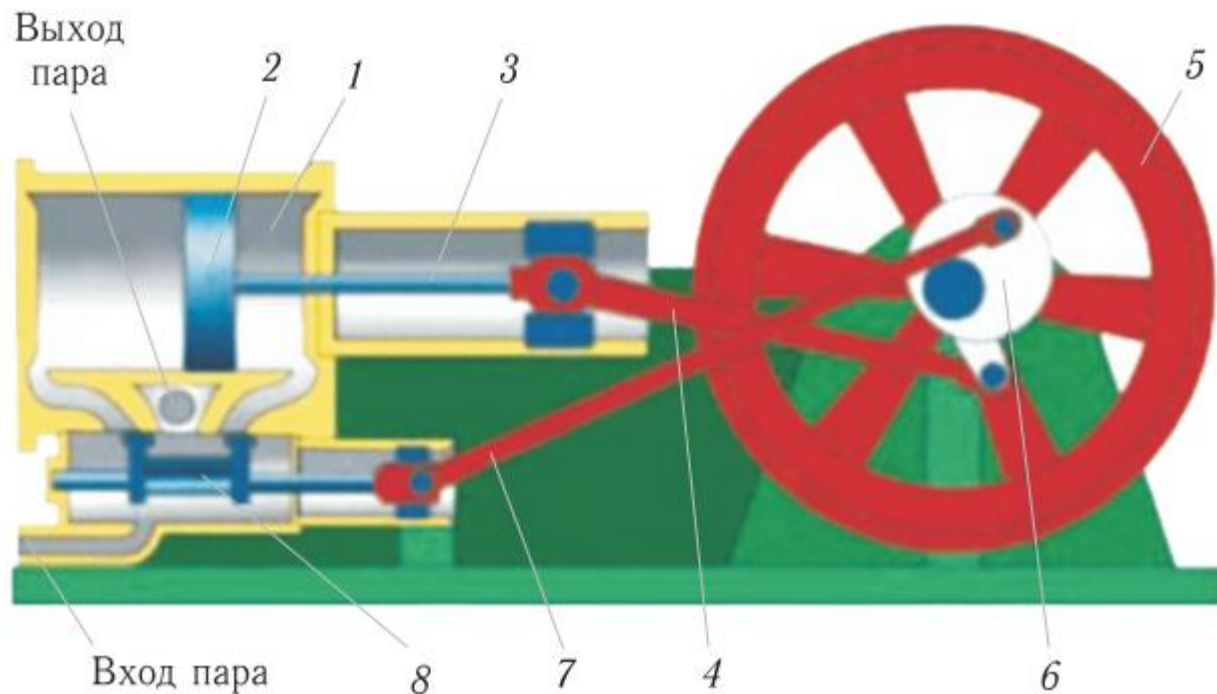
**Тепловой насос** — устройство для переноса тепловой энергии от источника с низкой температурой к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой.

# Принцип действия паровой машины



Эксцентрик 6 с помощью тяги 7 приводит в движение золотник 8, управляющий впуском пара в рабочий цилиндр. Пар из цилиндра выпускается в атмосферу или поступает в конденсатор, где он превращается в воду. Для поддержания постоянного числа оборотов вала при изменяющейся нагрузке паровые машины снабжаются центробежным регулятором, автоматически изменяющим сечение прохода пара, поступающего в цилиндр.

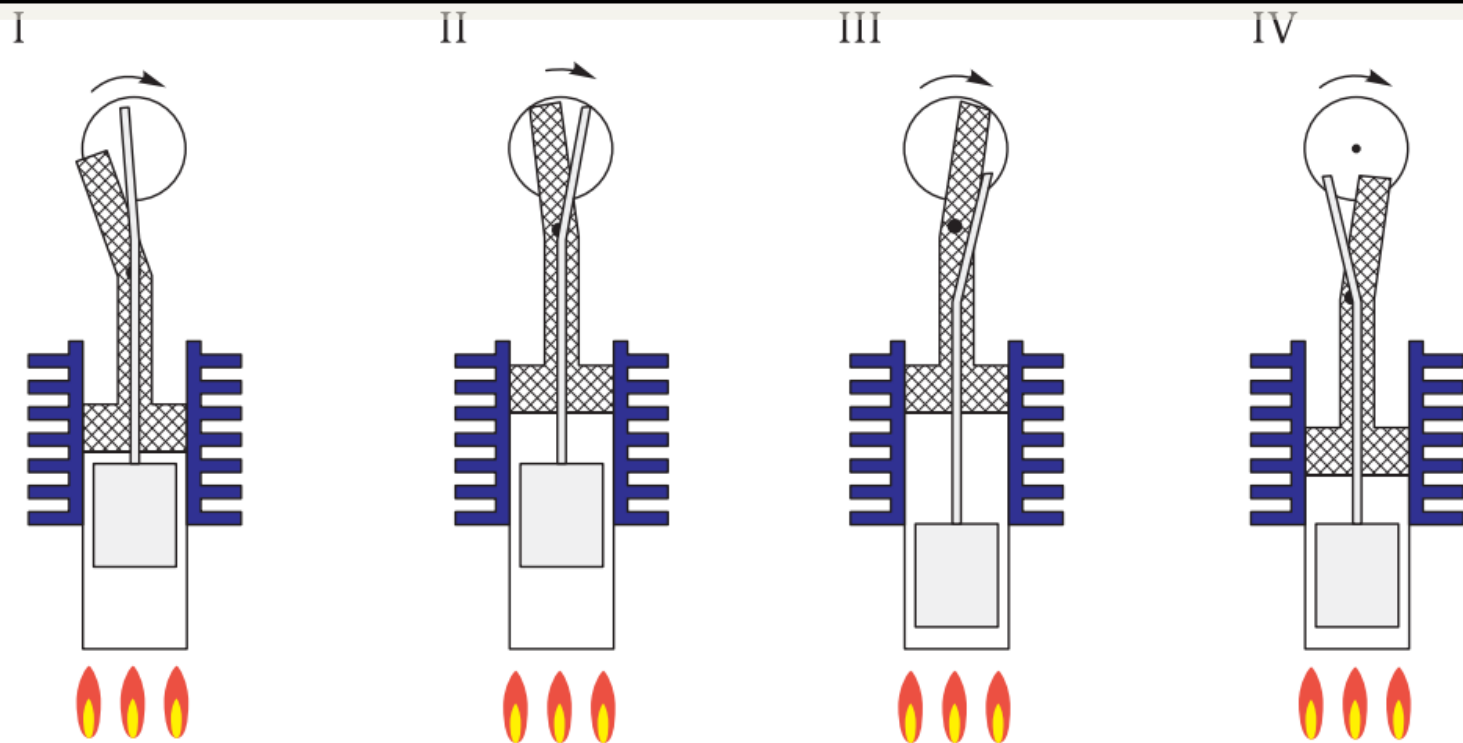
# Принцип действия паровой машины



- 1 цилиндр
- 2 поршень
- 3 шток
- 4 шатуна
- 5 маховик
- 6 эксцентрик
- 7 тяги
- 8 золотник

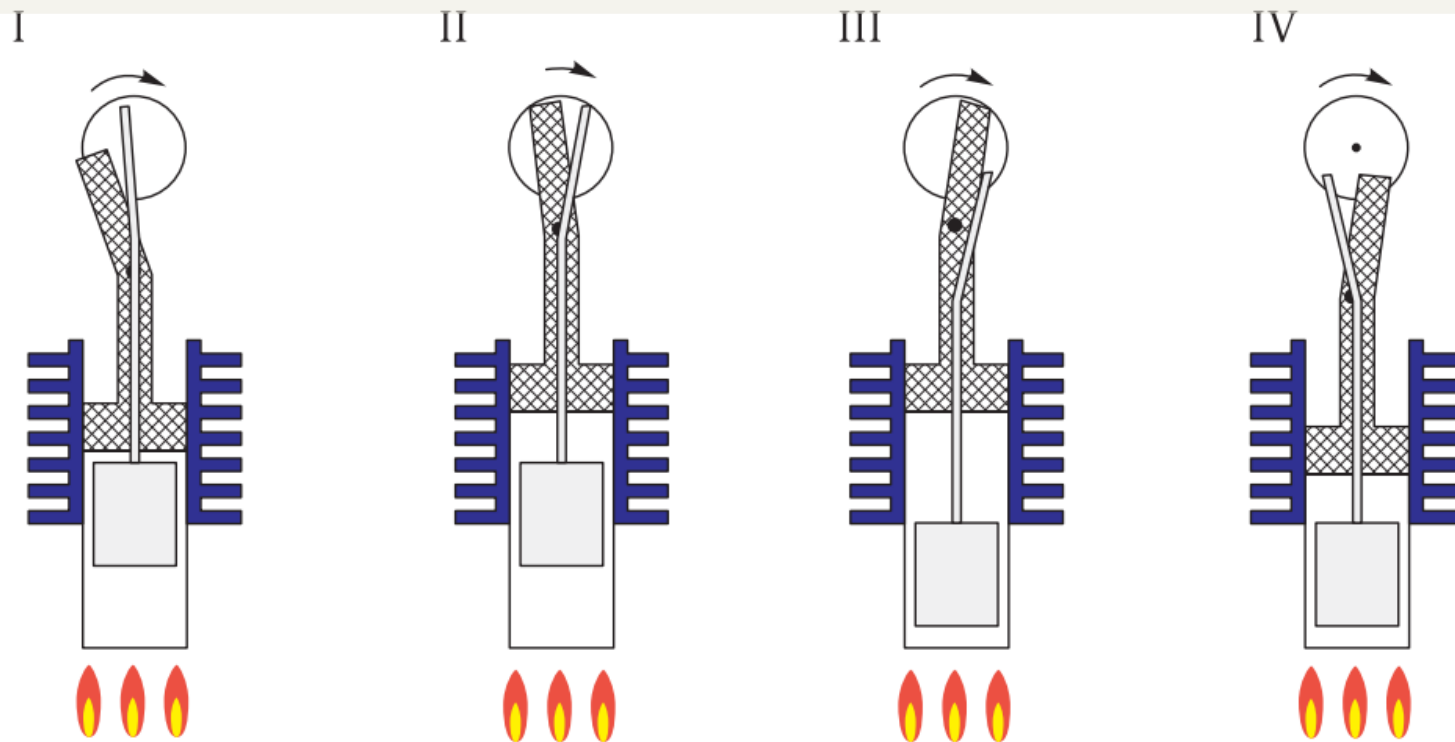
Роль нагревателя выполняет топка, в которой находится котел с водой, а холодильником является окружающий воздух. Коэффициент полезного действия паровой машины невелик и обычно не превышает 10 %.

# Принцип действия двигателя Стирлинга



В XIX веке инженеры хотели создать безопасную замену паровым двигателям, котлы которых часто взрывались из-за высоких давлений пара и неподходящих материалов для их постройки. В 1816 г. шотландским священником Р. Стирлингом был запатентован двигатель, который оказался не только безопасным, но и несравненно более эффективным.

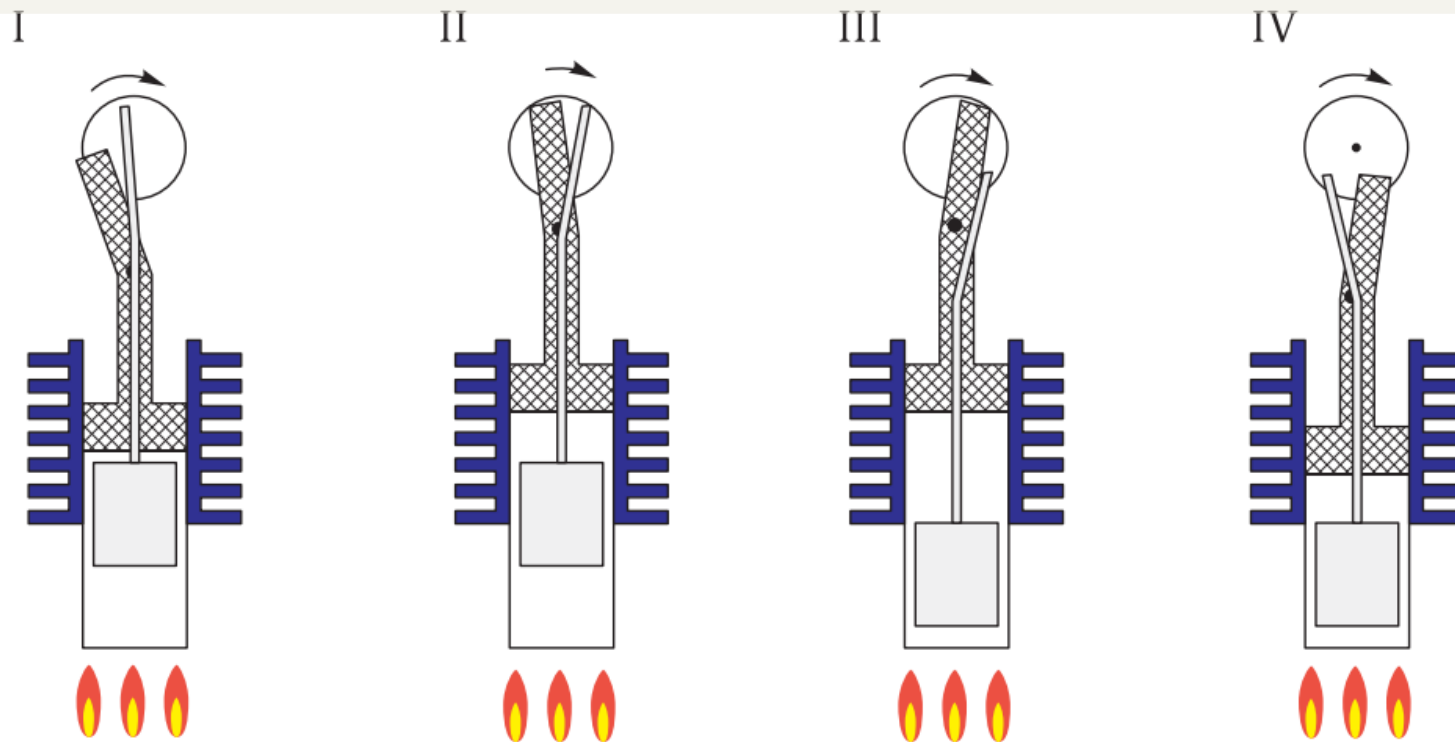
# Принцип действия двигателя Стирлинга



I. При нагреве газа от внешнего источника тепла рабочий поршень перемещается вверх.

II. Одновременно, но с запаздыванием по фазе на  $90^\circ$ , маховик толкает вытеснительный поршень вниз.

# Принцип действия двигателя Стирлинга

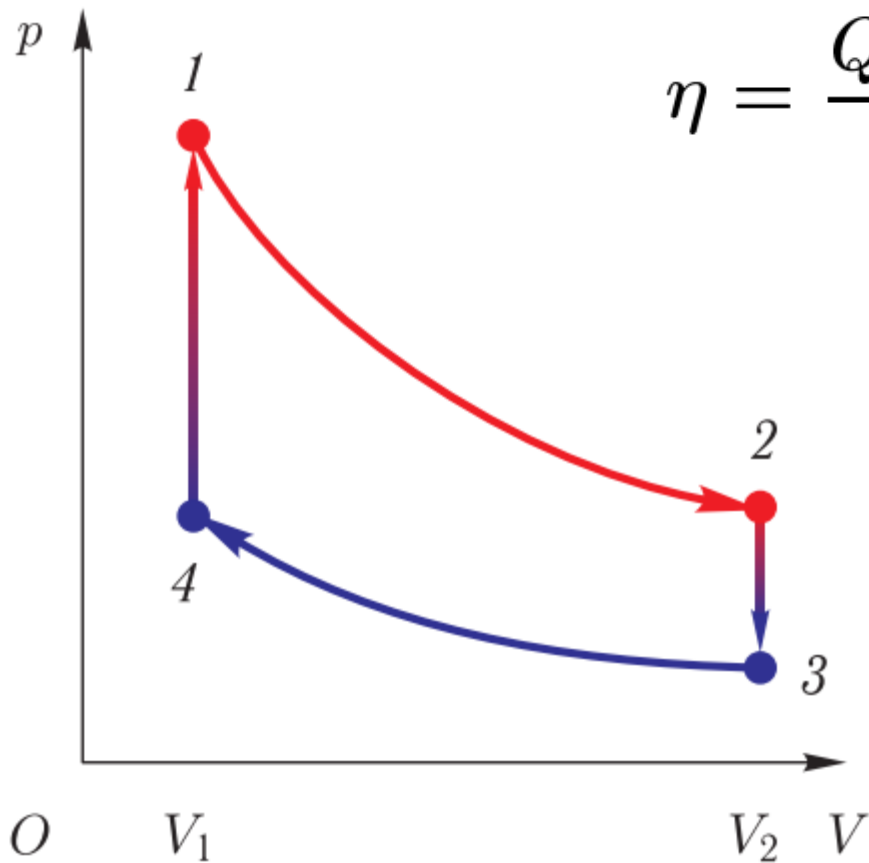


III. Горячий газу перемещается через неплотный зазор вверх и отдает часть теплоты охлаждающим ребрам.

IV. После охлаждения воздуха рабочий поршень опускается вниз, а вытеснительный — вверх.

Холодный газ оказывается в нижней части цилиндра, и процесс повторяется вновь.

# Цикл Стирлинга



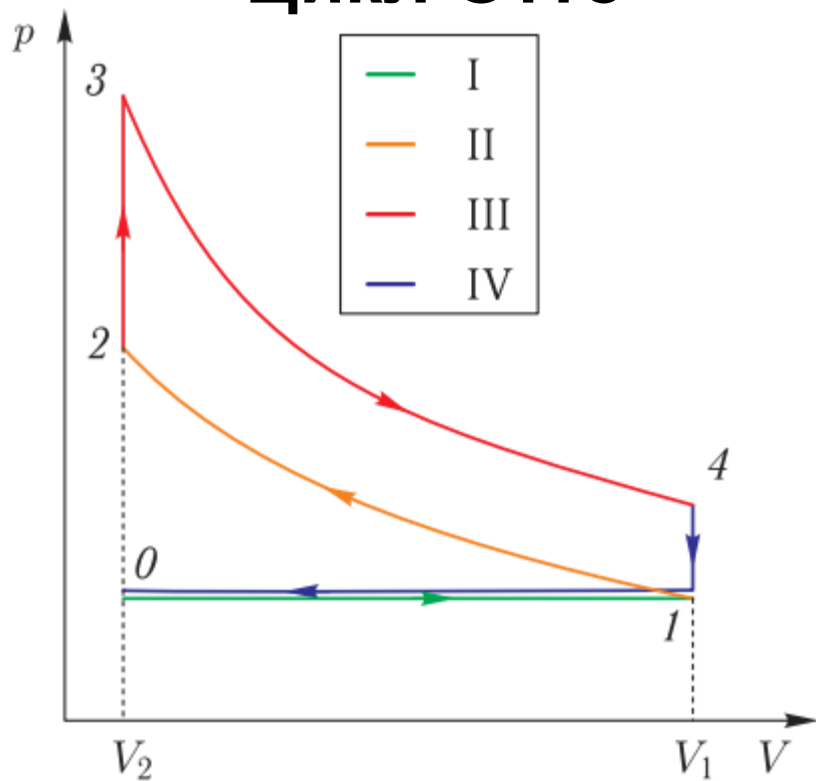
$$\eta = \frac{Q^+ + Q^-}{Q^+} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{C_V(T_1 - T_2)}{R \ln(V_2/V_1)}}$$

Хотя КПД двигателя Стирлинга меньше, чем у обратимой машины Карно, двигатель Стирлинга имеет ряд преимуществ перед машиной Карно: его отличают простота конструкции и надежность,

возможность работать при небольшом перепаде температур, при котором не может работать паровая или газовая турбина. Он не расходует рабочее тело и не загрязняет окружающую среду, не имеет выхлопа и бесшумен.

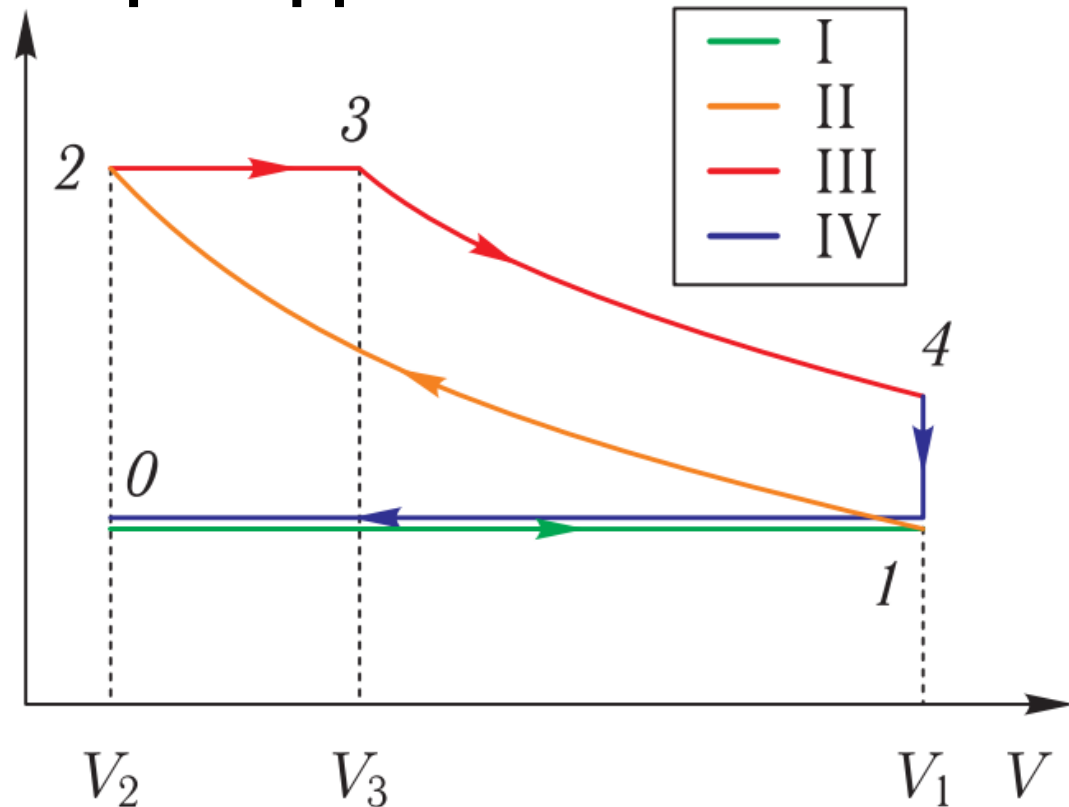
# Двигатели внутреннего сгорания

## Цикл Отто



$$\eta = 1 + \frac{Q^-}{Q^+} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

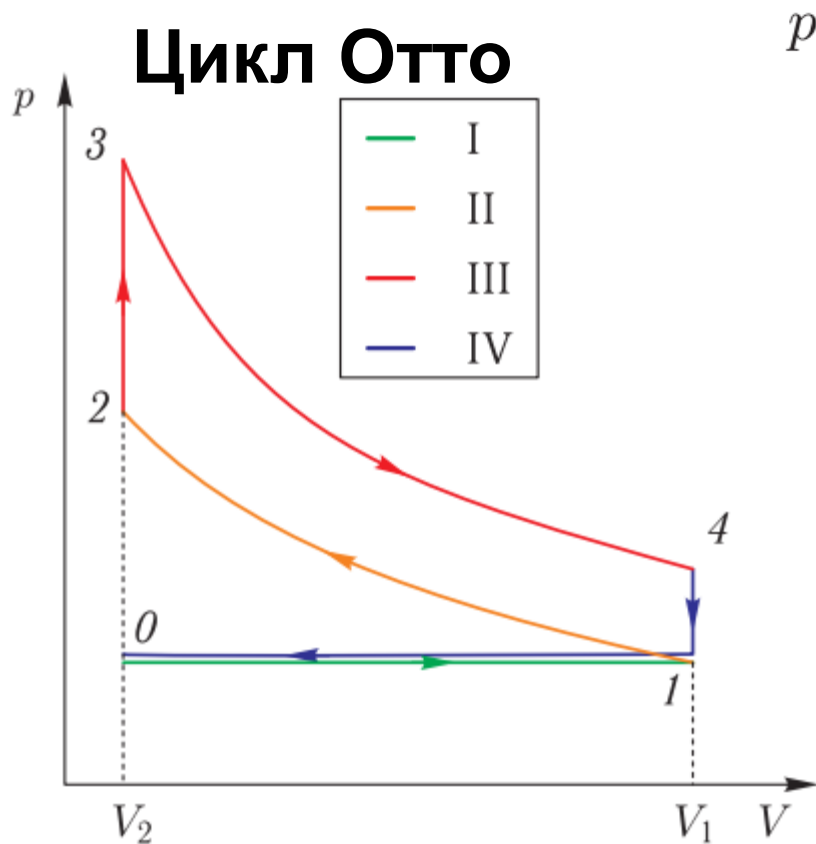
## Цикл Дизеля



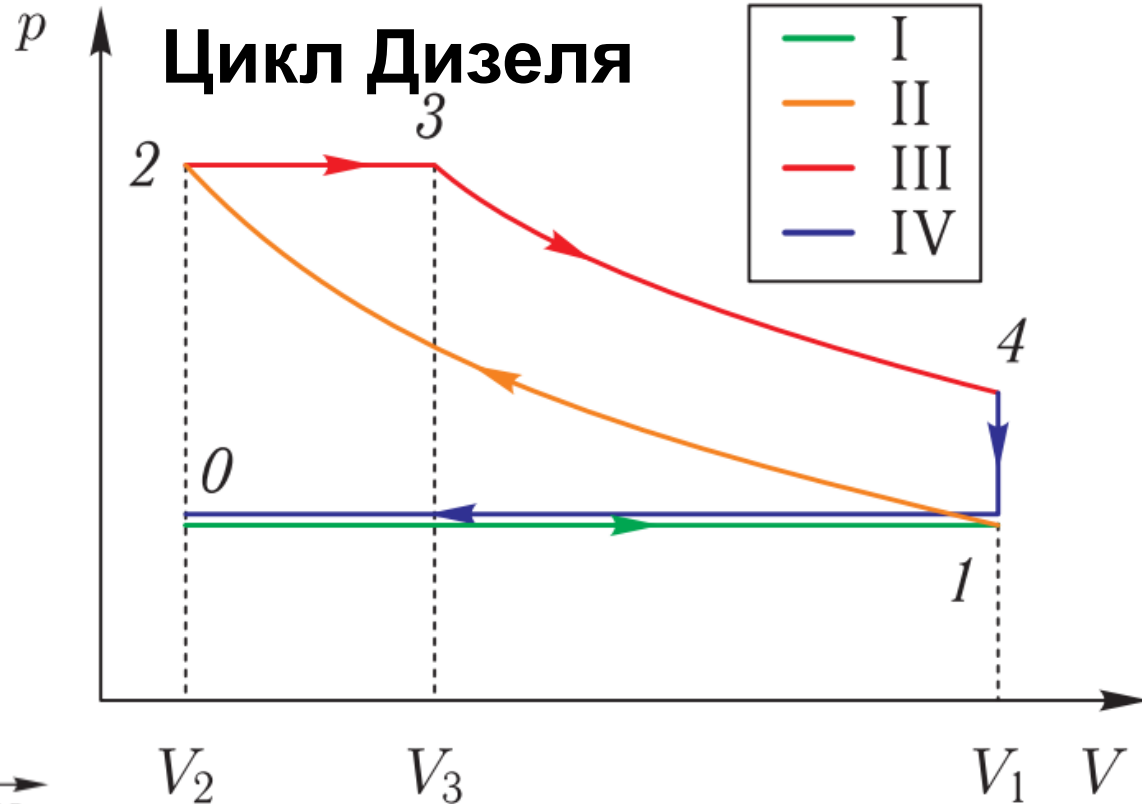
$$\eta = 1 + \frac{Q^-}{Q^+} = 1 + \frac{C_V(T_1 - T_4)}{C_P(T_3 - T_2)}$$

# Двигатели внутреннего сгорания

## Цикл Отто



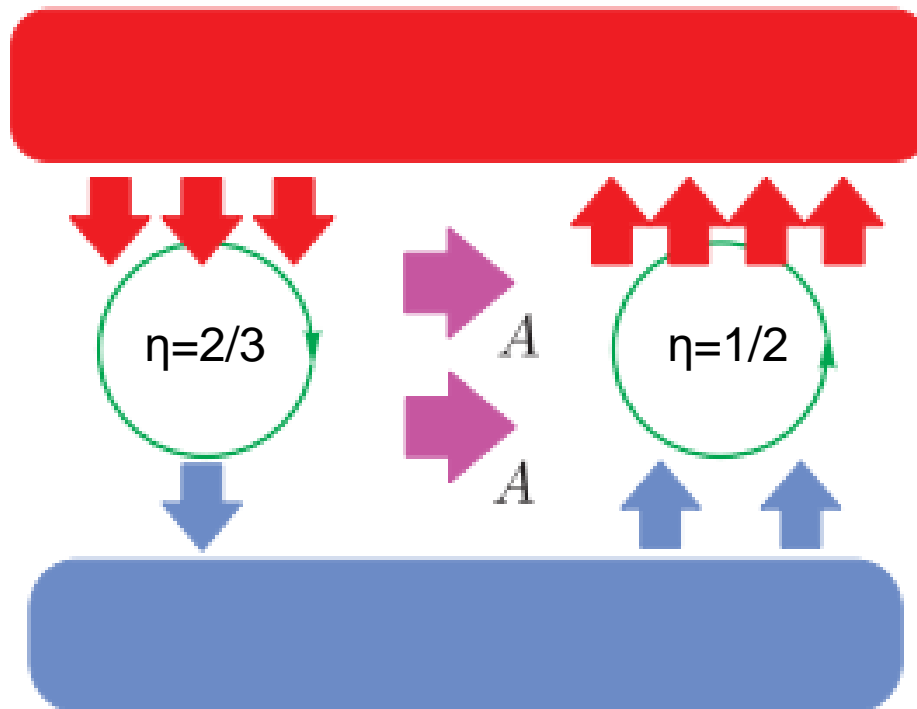
## Цикл Дизеля



У современных двигателей  $V_1/V_2=10$ , Полагая  $\gamma=1,4$  получаем  $\eta=0,6$ . Однако КПД реальных двигателей практически вдвое меньше полученной оценки  $\eta=(0,25-0,30)$ , что указывает на существенное отличие реального цикла от идеализированного цикла Отто.

# Теоремы Карно

- Первая теорема Карно:** КПД любой обратимой машины Карно определяется только температурами нагревателя и холодильника (т.е. не зависит от рода рабочего вещества и конструктивных деталей осуществления цикла).



# Теоремы Карно

- **Вторая теорема Карно** : КПД необратимой машины Карно не может быть больше КПД обратимой машины Карно, если в обеих машинах используются одни и те же нагреватель и холодильник.

