

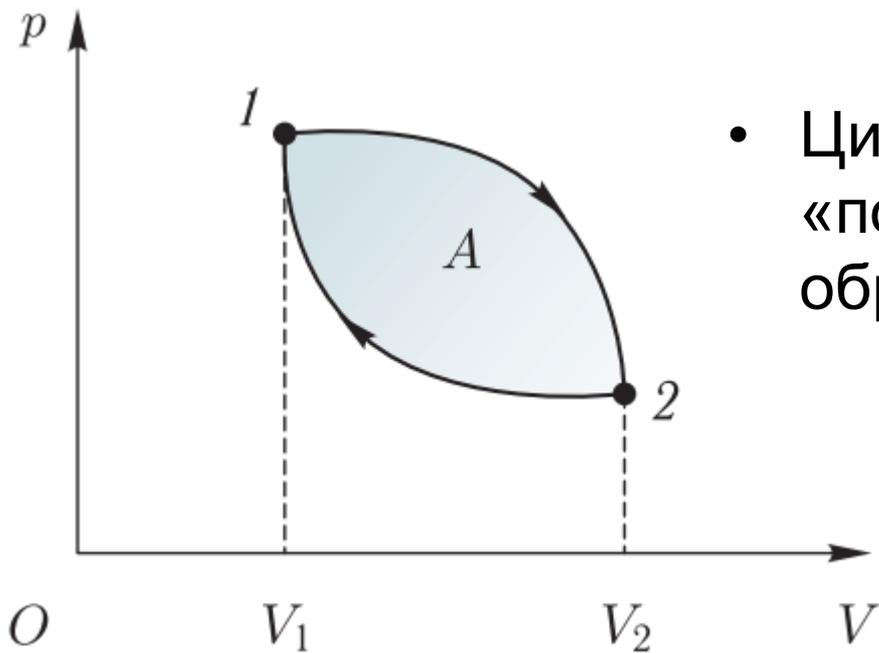
Циклические процессы

- 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.

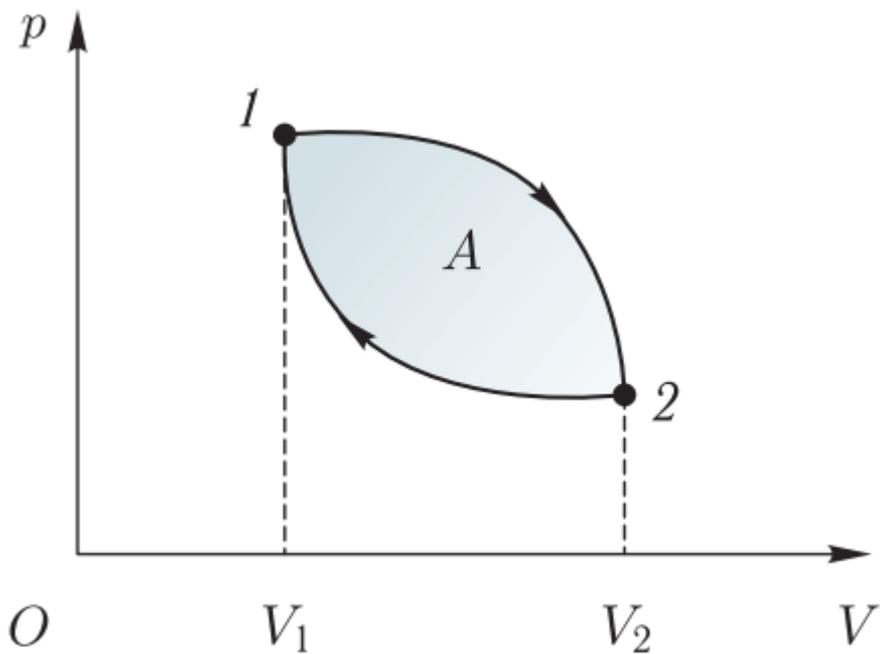
Циклическим называется процесс, начало и конец которого совпадают.



- 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

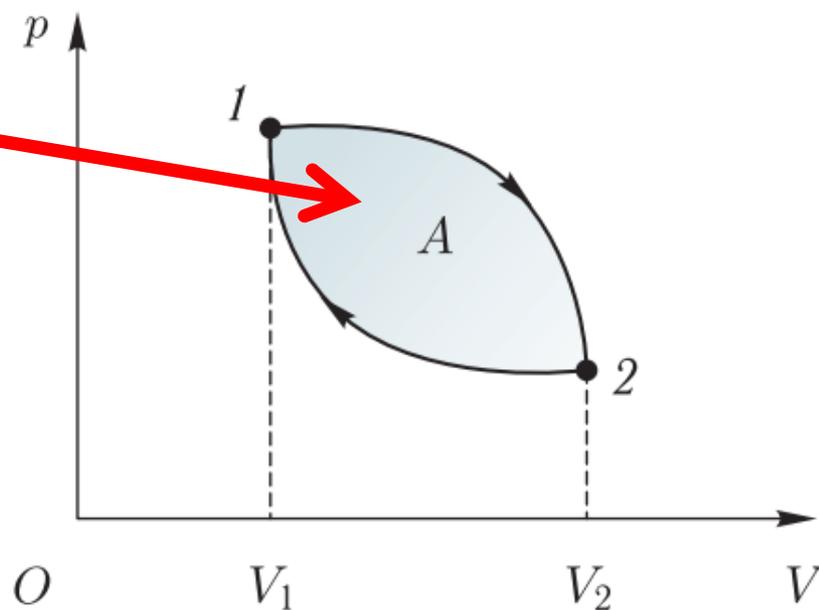
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV + \int_{V_2}^{V_1} p dV = \oint p dV$$

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.

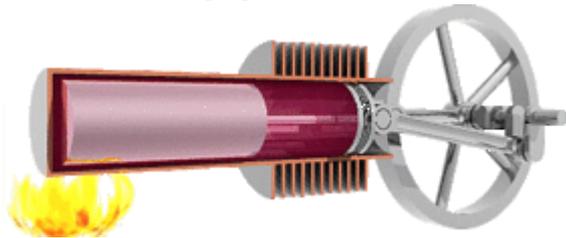
- Согласно первому началу термодинамики для обратимых процессов:

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

- 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



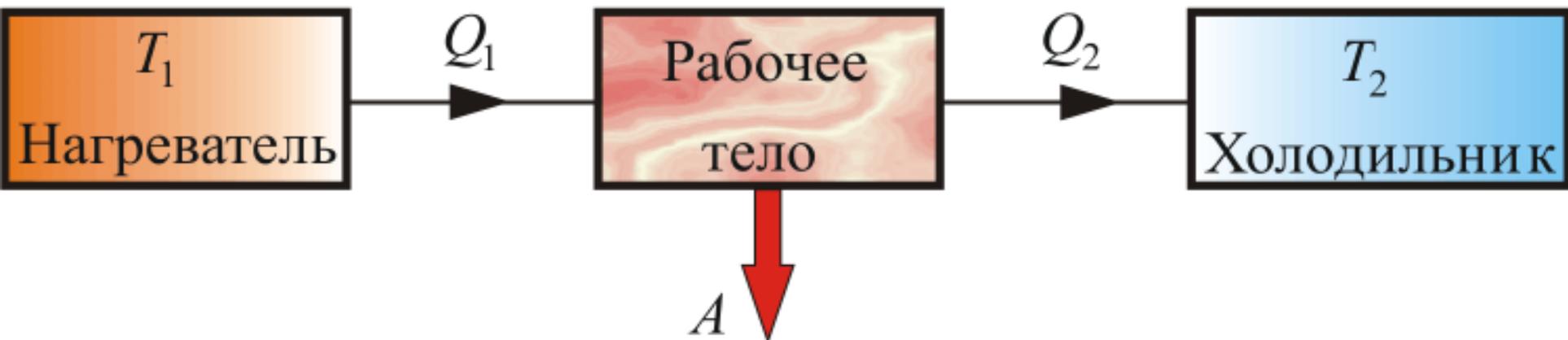
Коэффициент полезного действия

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.

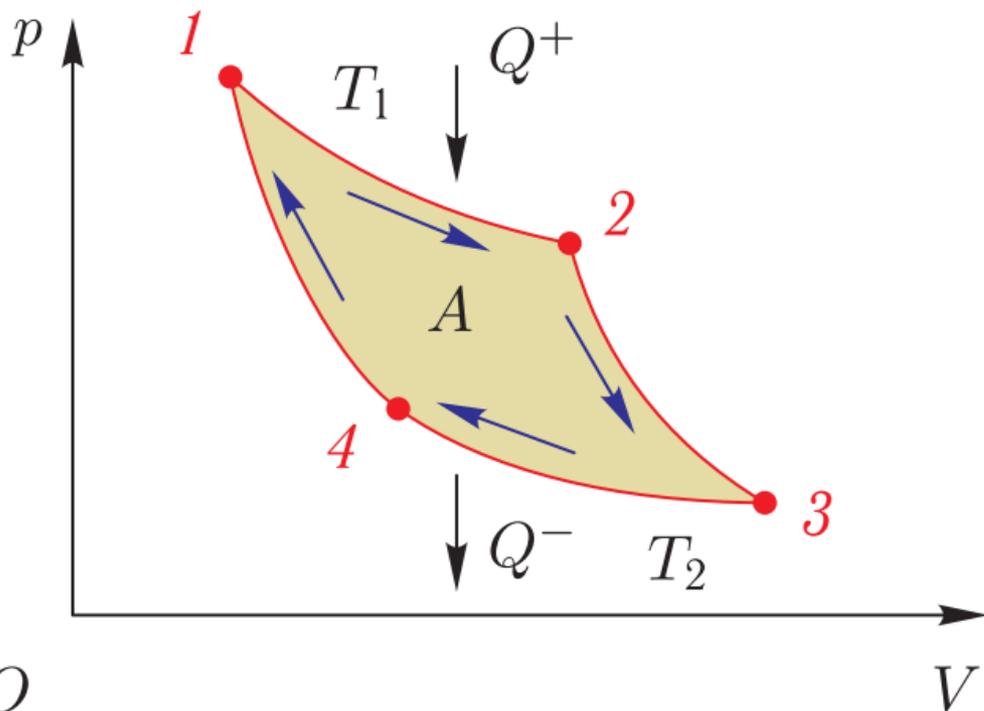


Цикл Карно

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.

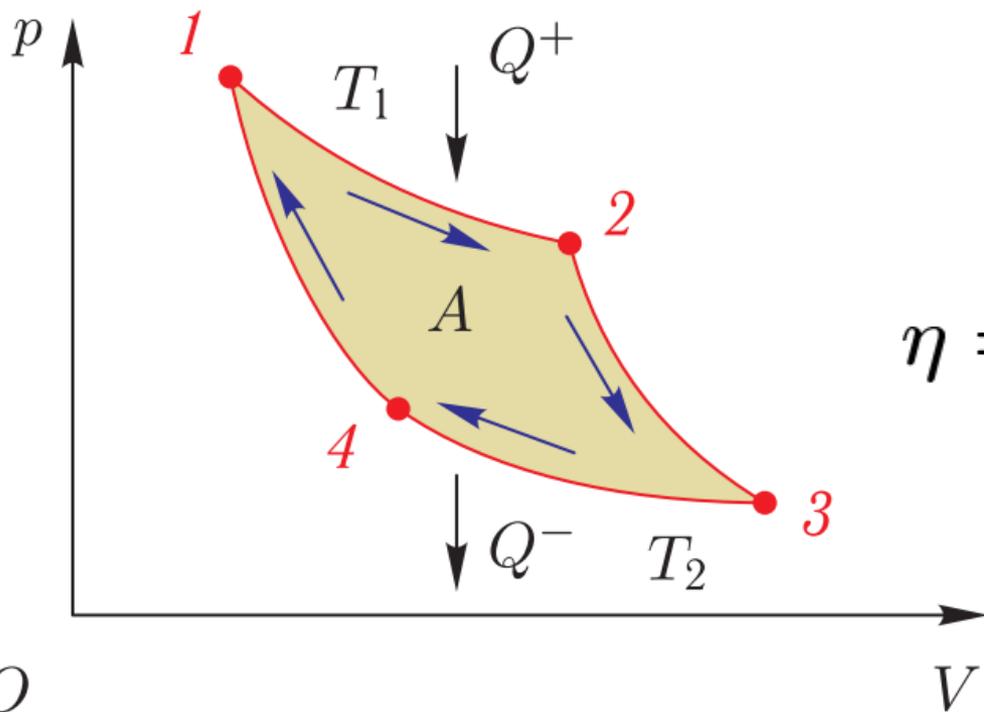
1-2 изотермическое расширение рабочего тела при температуре T_1 , которое получает теплоту Q^+ от нагревателя.

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

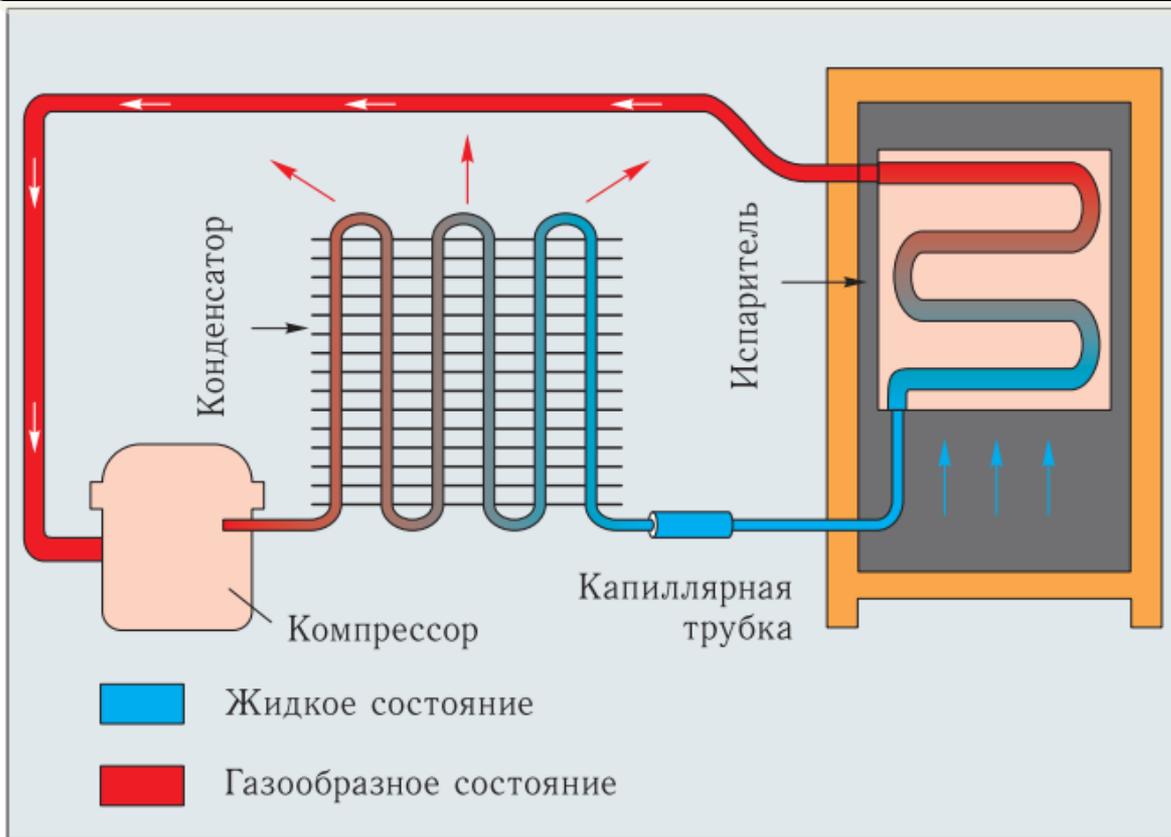


$$\eta = 1 + \frac{Q^-}{Q^+} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

O

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

Принцип действия холодильной машины



Холодильный коэффициент

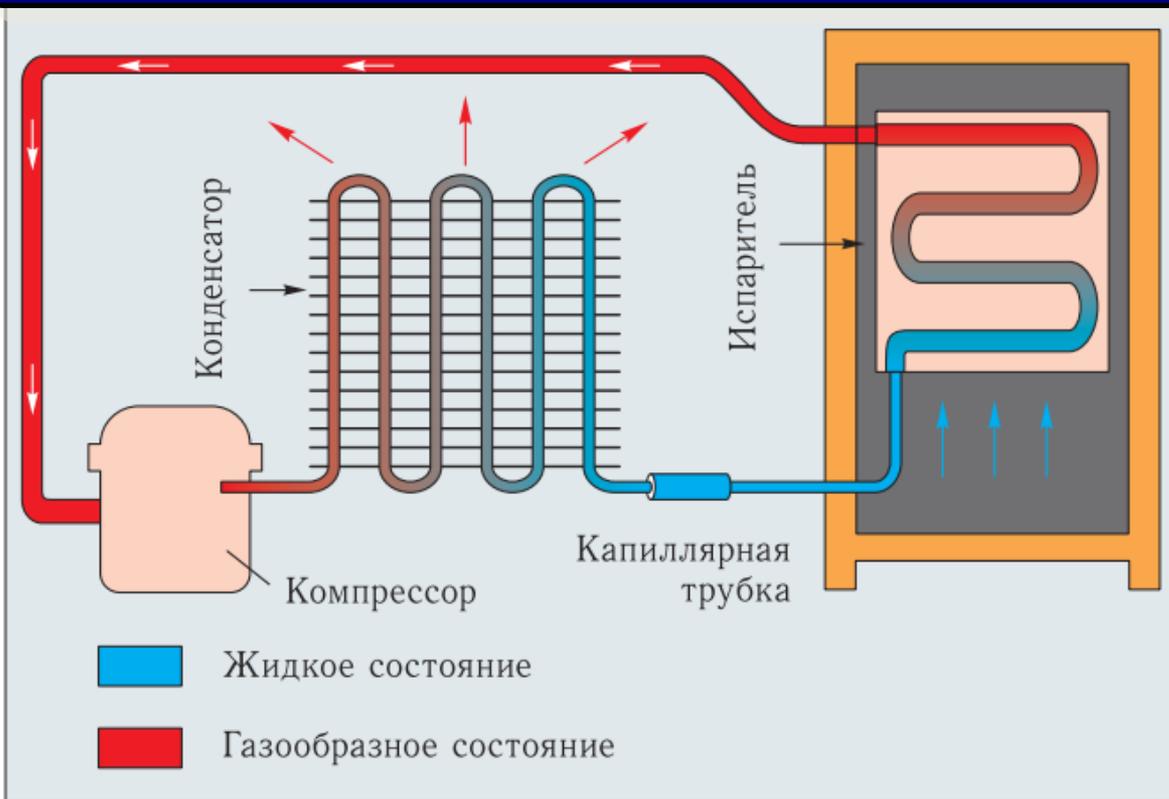
$$\eta_X = \frac{|Q^-|}{A_{\text{ВН}}} =$$

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

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

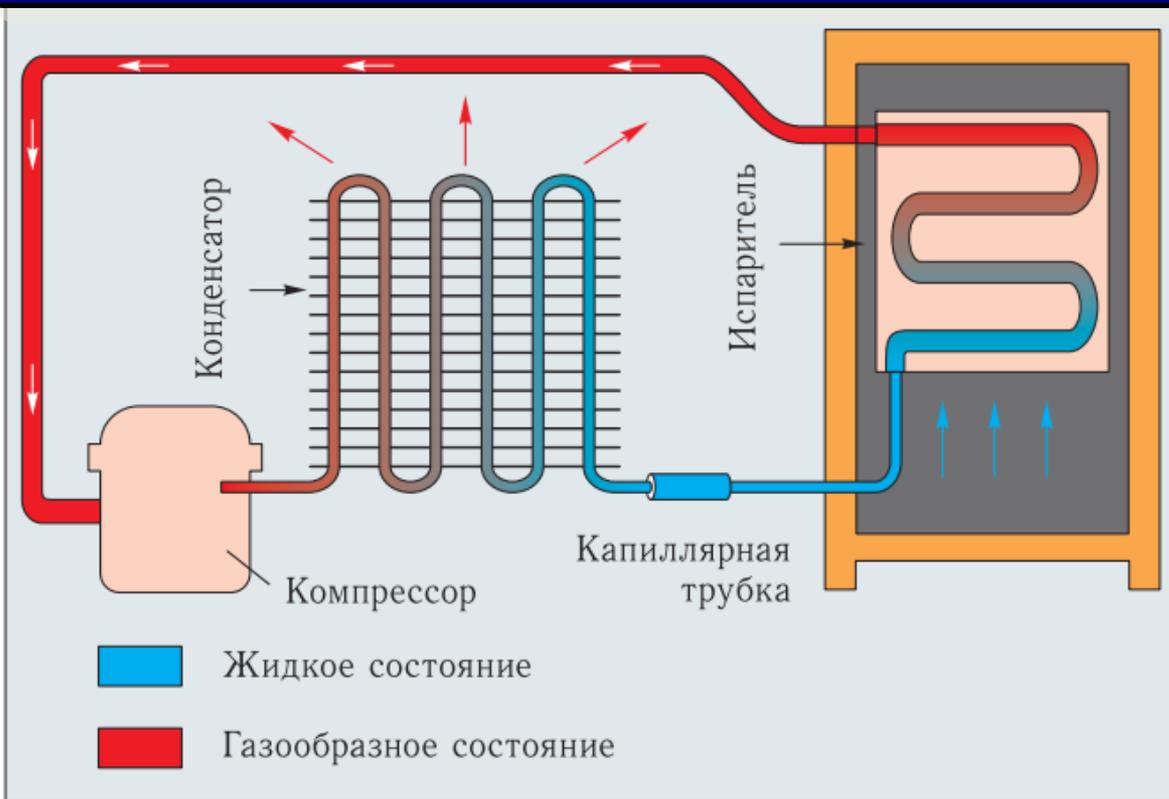
Цикл Карно, осуществляемый в обратном направлении (против часовой стрелки) является циклом, на основе которого могут функционировать холодильные установки и тепловые насосы.

Принцип действия холодильной машины



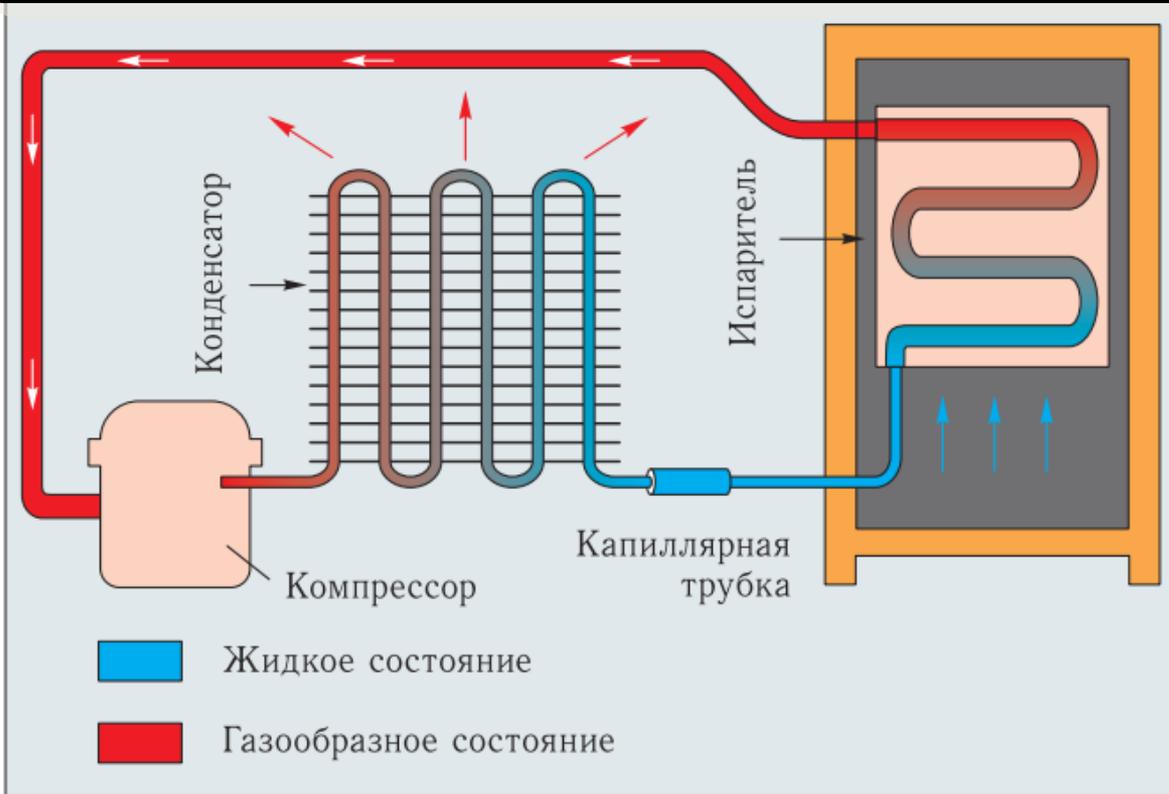
Компрессор засасывает из испарителя холодные пары хладагента и, сжав их, выталкивает в **конденсатор**. При этом температура сжатого пара увеличивается. **Хладагент** — вещество, переносящее теплоту от испарителя к конденсатору.

Принцип действия холодильной машины



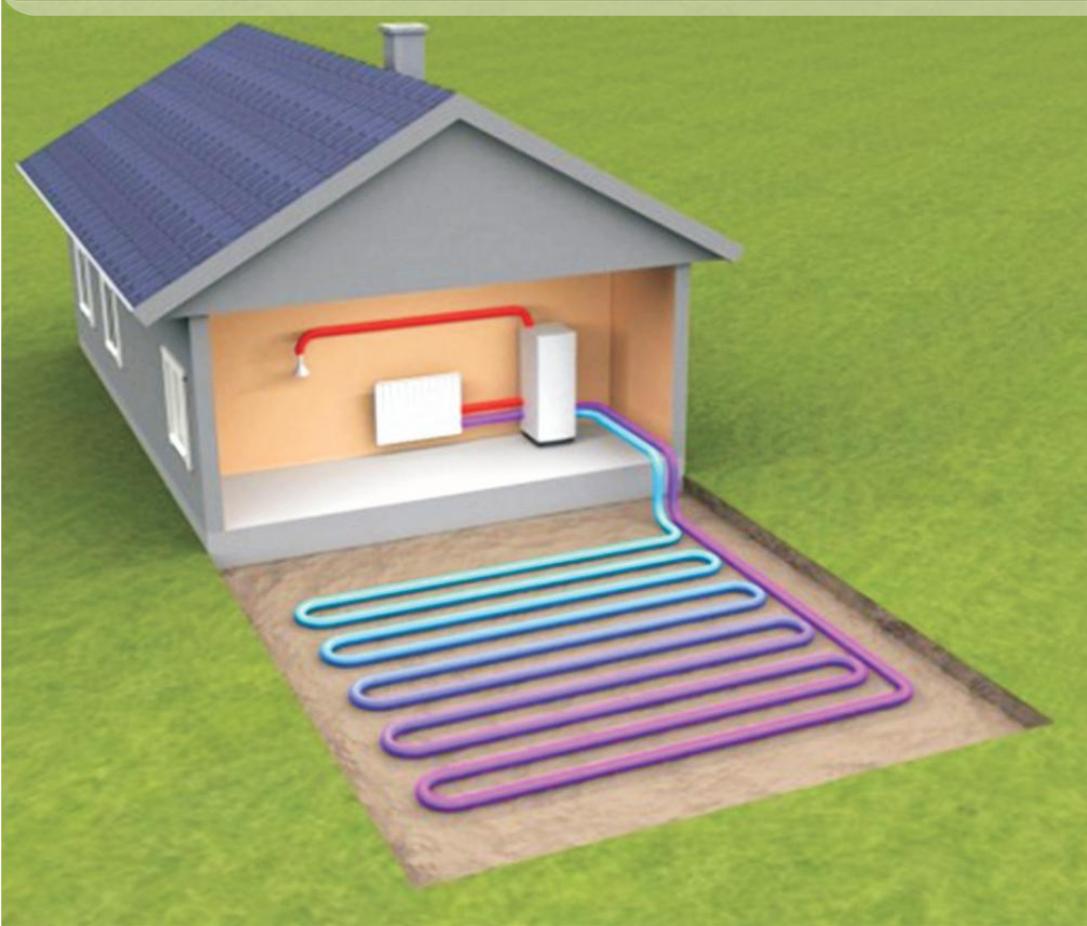
В конденсаторе пары остывают, и пар превращается в жидкость. Остывший жидкий хладагент под давлением через дросселирующее отверстие (капилляр) поступает в **испаритель**, где за счет резкого уменьшения давления происходит испарение жидкости.

Принцип действия холодильной машины



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

Тепловой насос

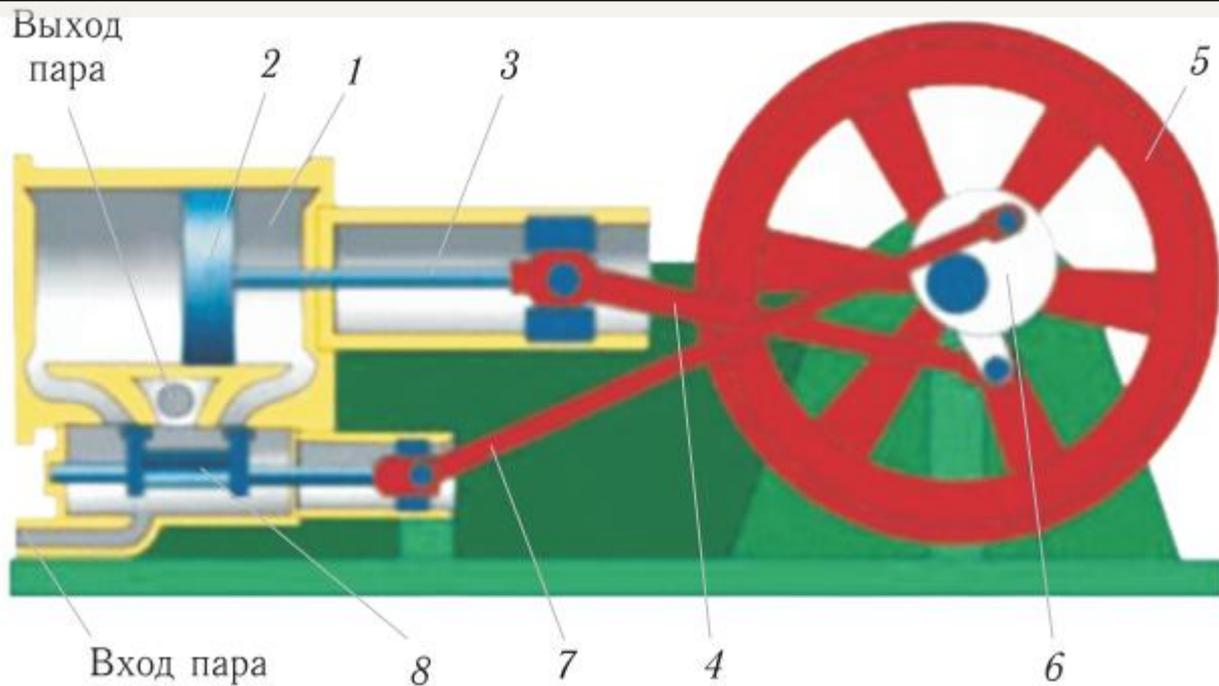


Эффективность тепловых насосов принято характеризовать величиной коэффициента трансформации энергии $\eta_{\text{ТР}}$, определяемого для обратимого цикла Карно по формуле:

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

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

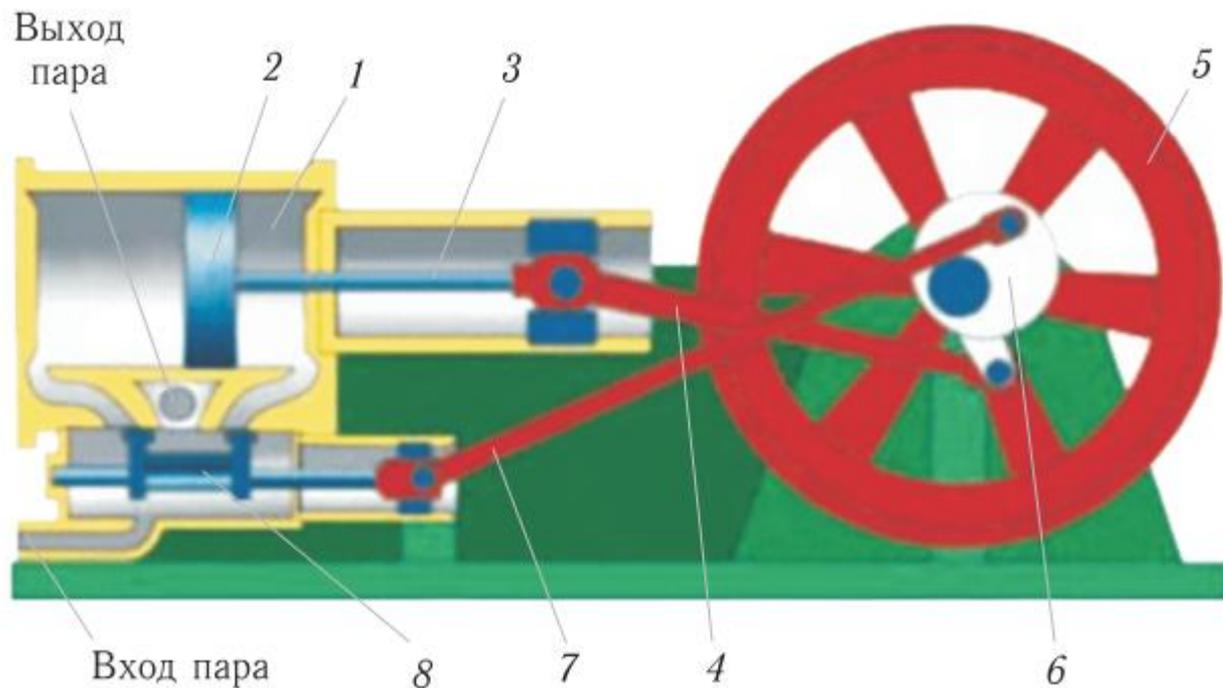
Принцип действия паровой машины



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

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.

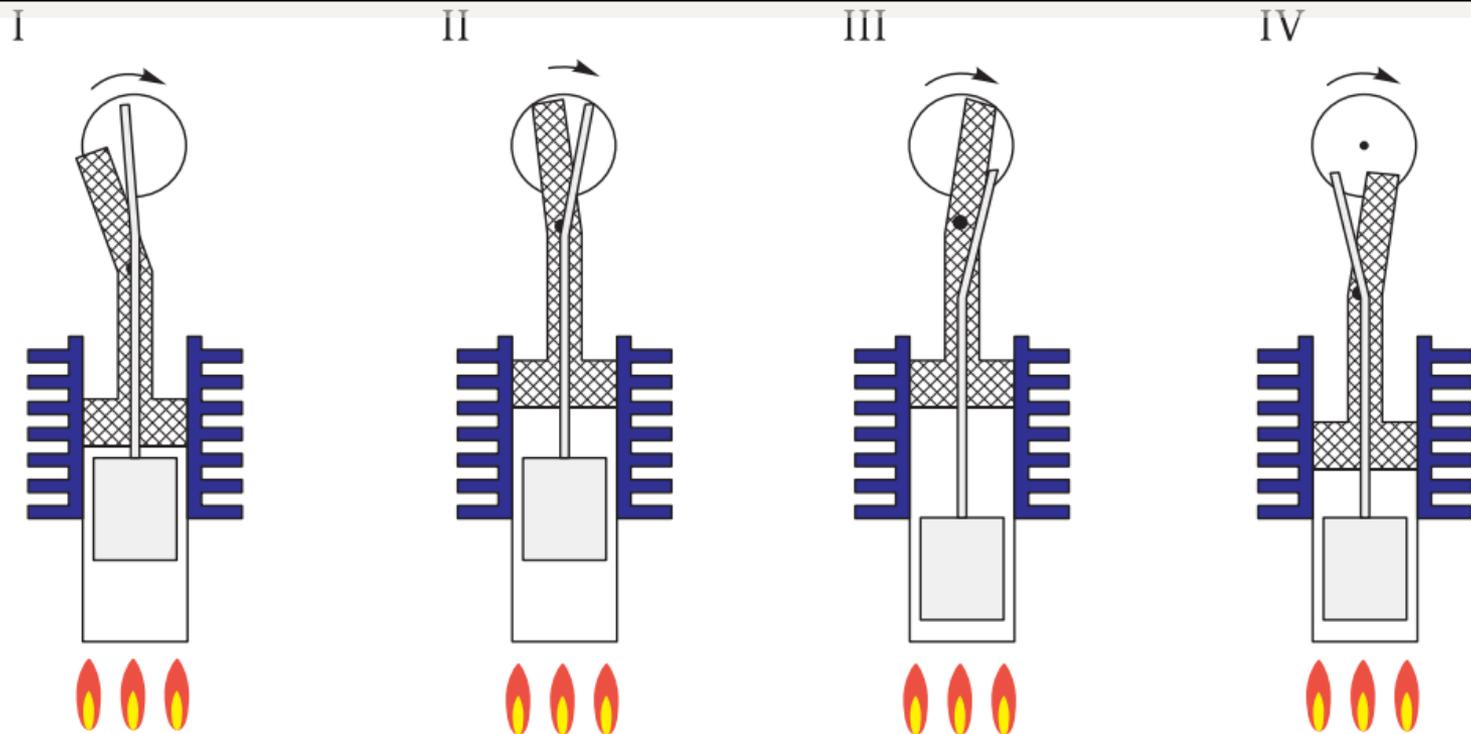
Принцип действия паровой машины



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

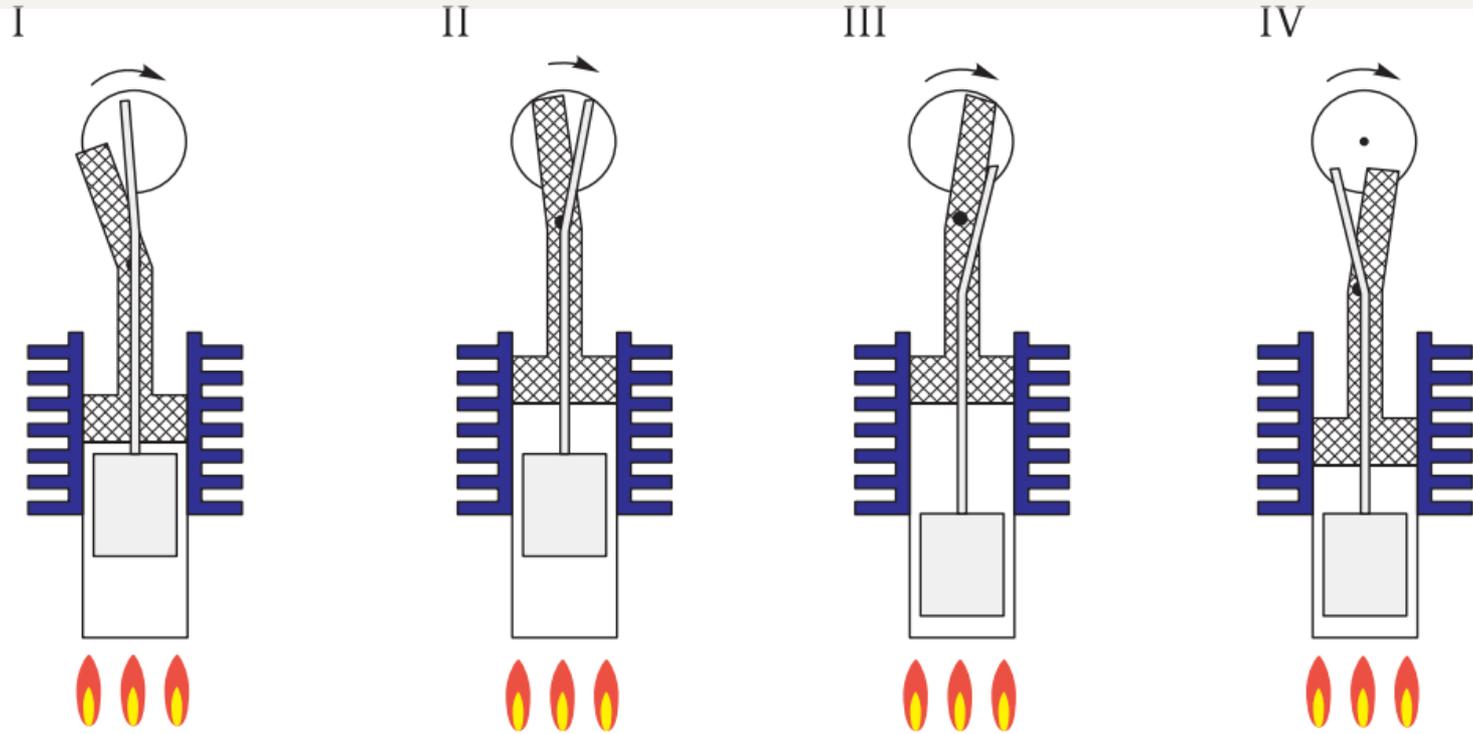
Роль нагревателя выполняет топка, в которой находится котел с водой, а холодильником является окружающий воздух. Коэффициент полезного действия паровой машины невелик и обычно не превышает 10 %.

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.

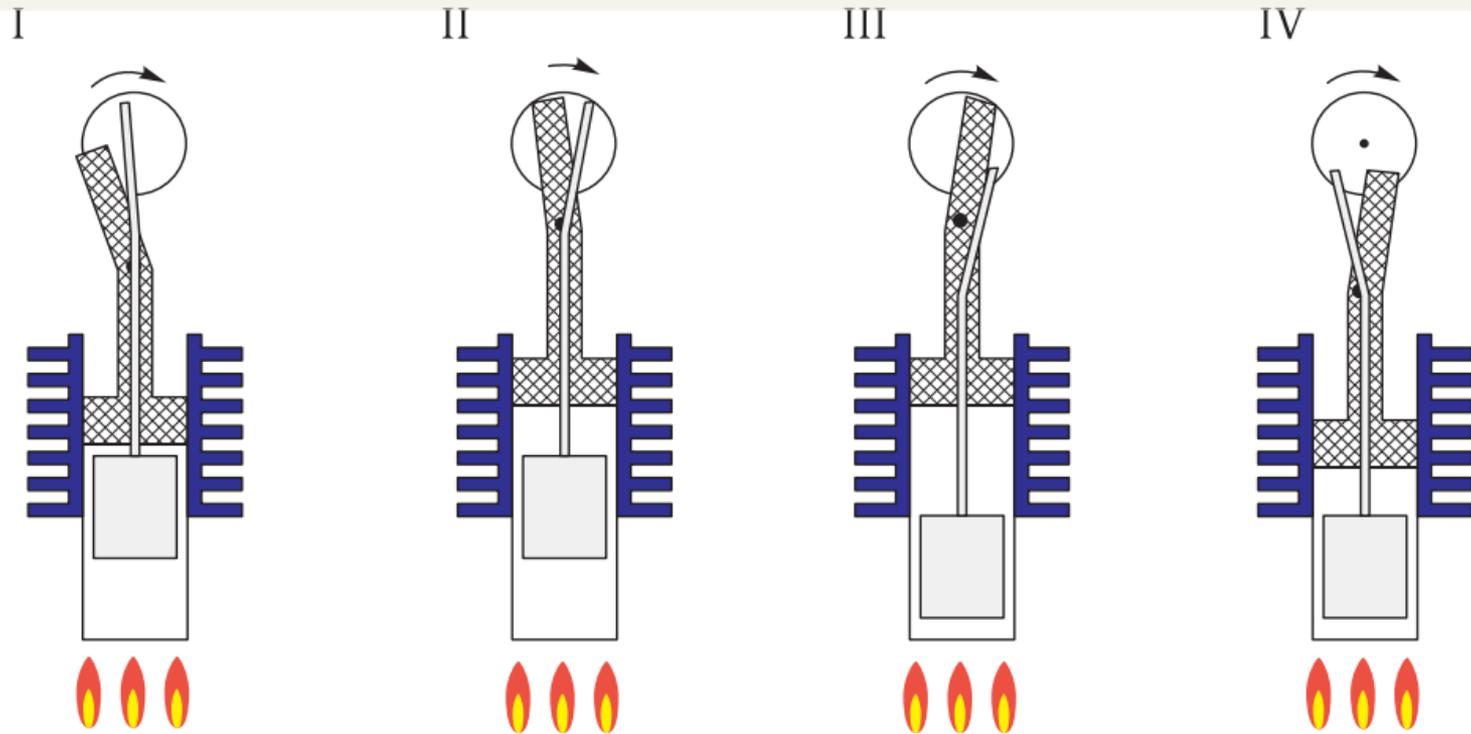
Принцип действия двигателя Стирлинга



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

II. Одновременно, но с запаздыванием по фазе на 90° , маховик толкает вытеснительный поршень вниз.

Принцип действия двигателя Стирлинга

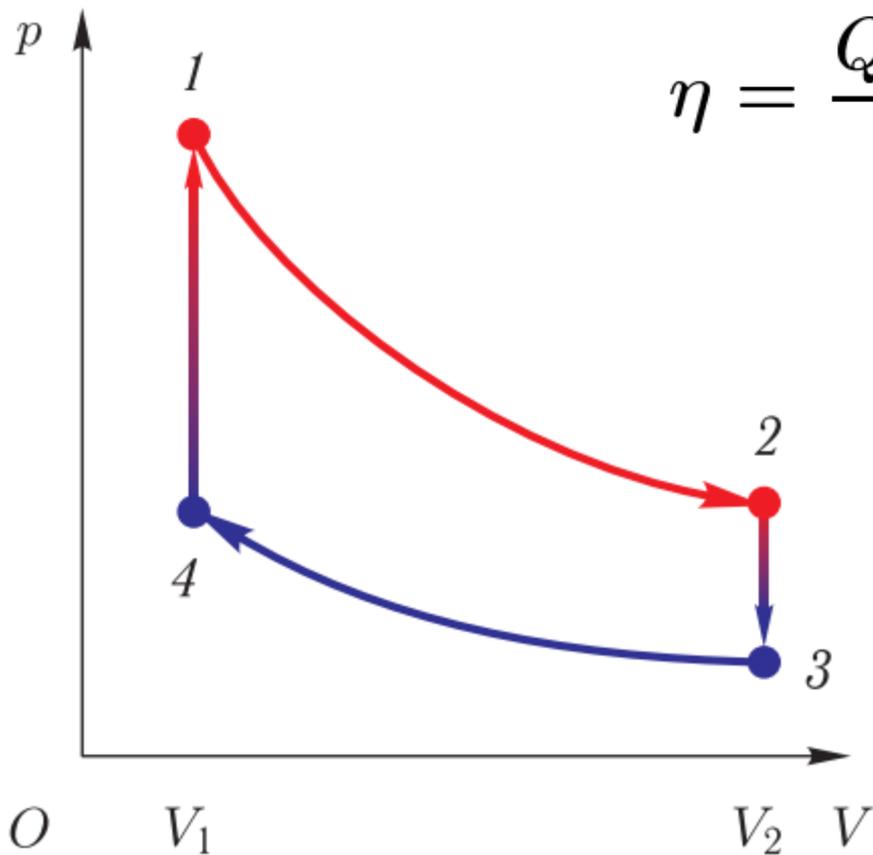


III. Горячий газу перемещается через неплотный зазор вверх и отдает часть теплоты охлаждающим ребрам.

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

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

Цикл Стирлинга



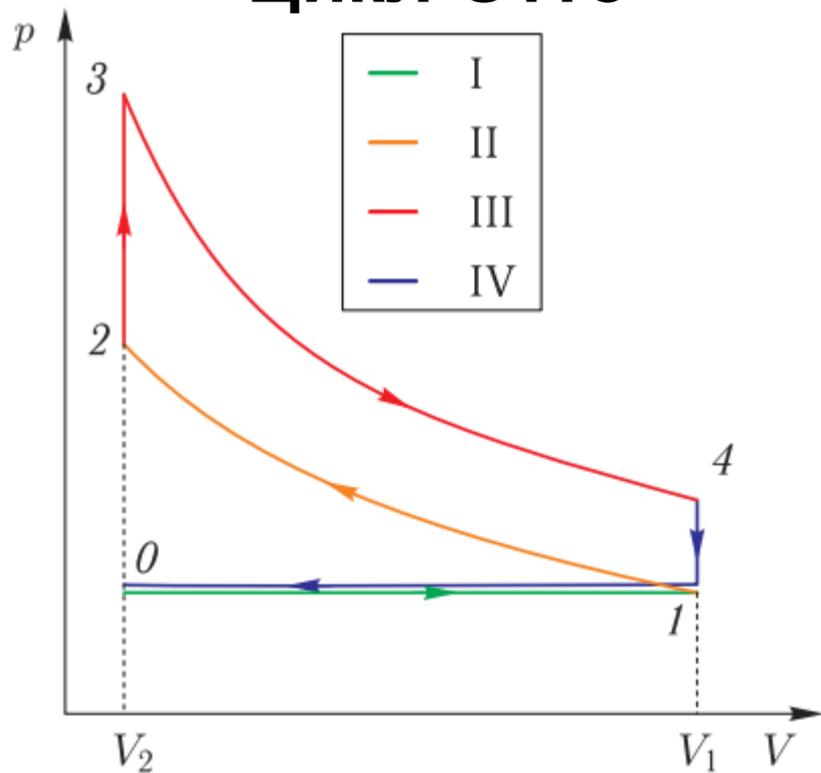
$$\eta = \frac{Q^+ + Q^-}{Q^+} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{C_V(T_1 - T_2)}{R \ln(V_2/V_1)}}$$

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

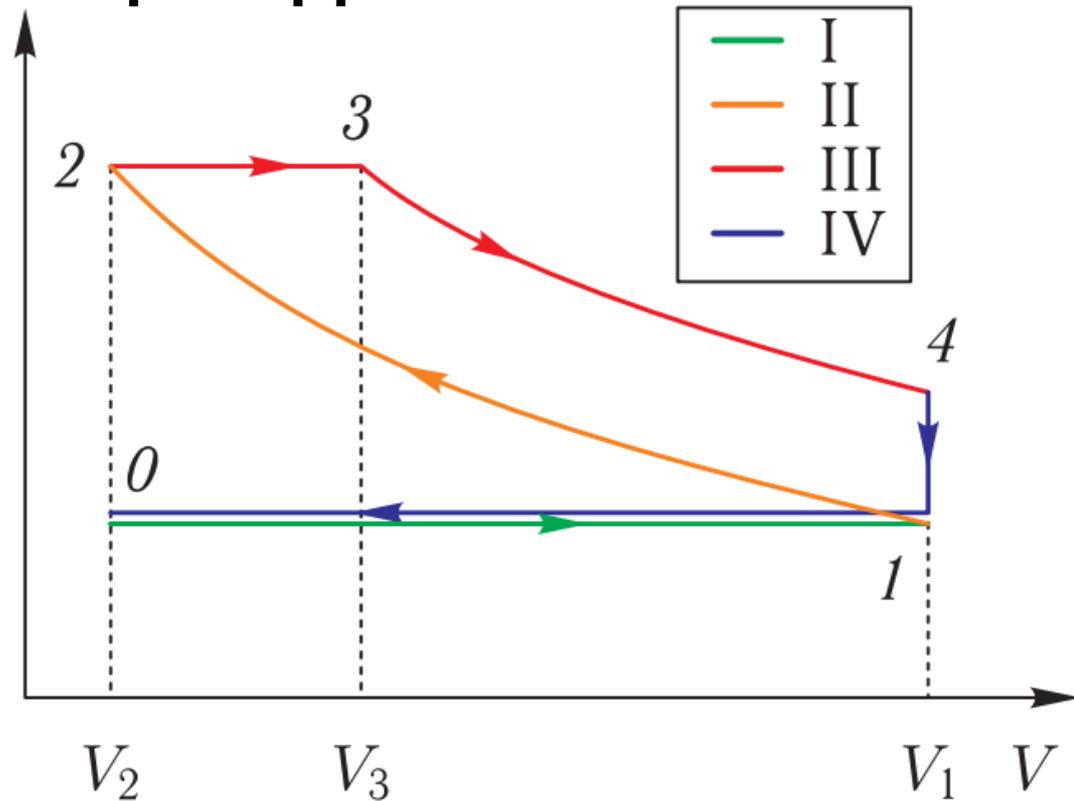
возможность работать при небольшом перепаде температур, при котором не может работать паровая или газовая турбина. Он не расходует рабочее тело и не загрязняет окружающую среду, не имеет выхлопа и бесшумен.

Двигатели внутреннего сгорания

Цикл Отто



Цикл Дизеля



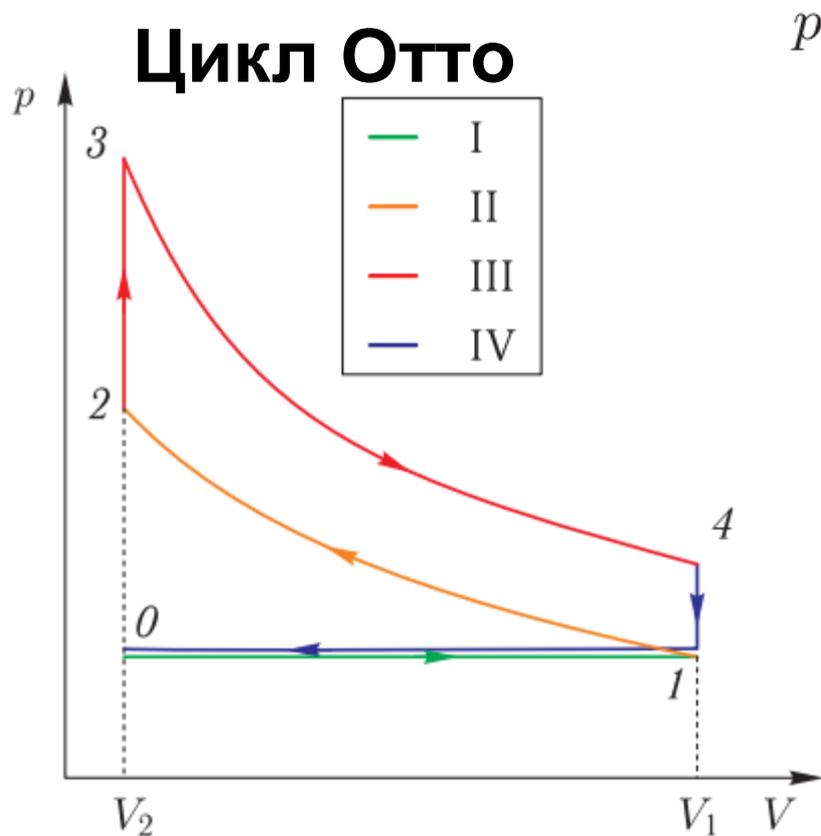
$$\eta = 1 + \frac{Q^-}{Q^+} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

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

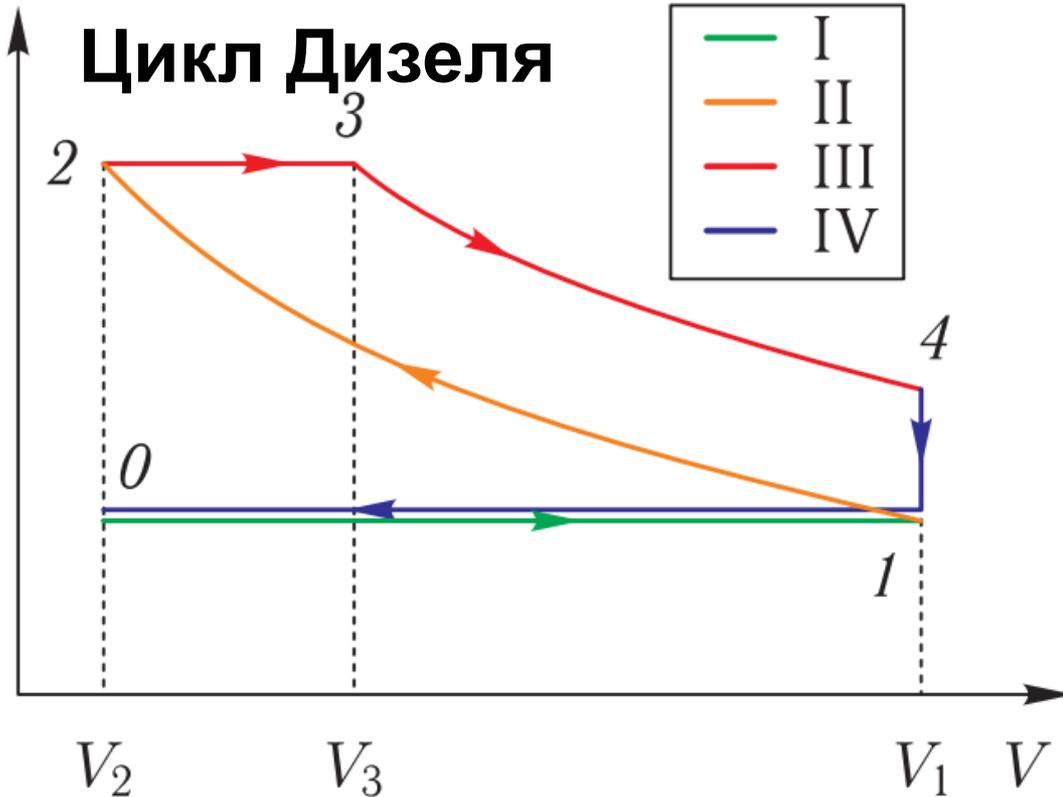
$$\eta = 1 + \frac{Q^-}{Q^+} = 1 + \frac{C_V(T_1 - T_4)}{C_P(T_3 - T_2)}$$

Двигатели внутреннего сгорания

Цикл Отто



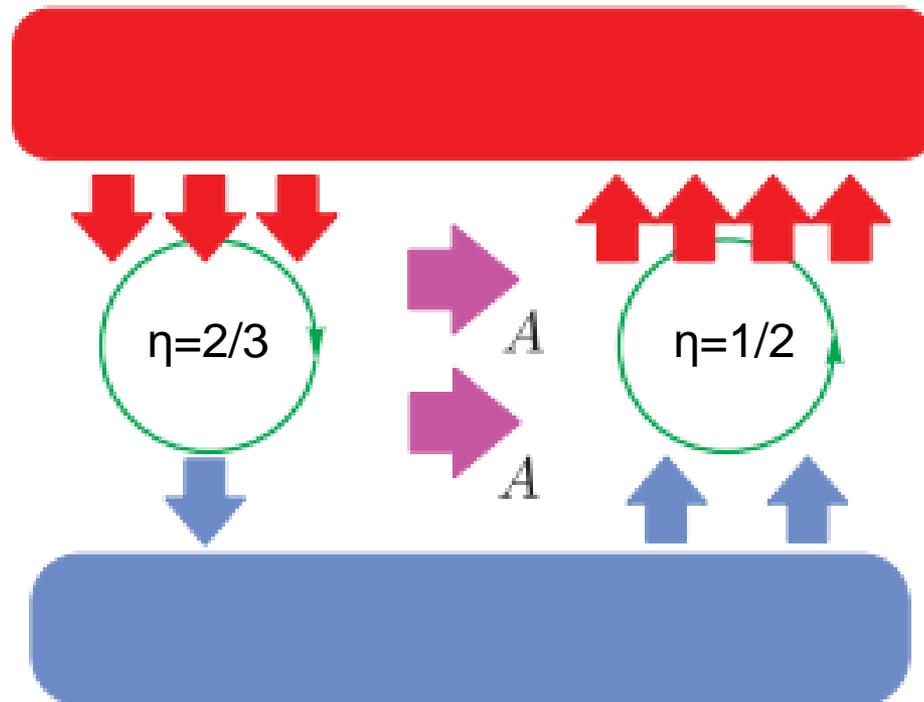
Цикл Дизеля



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.

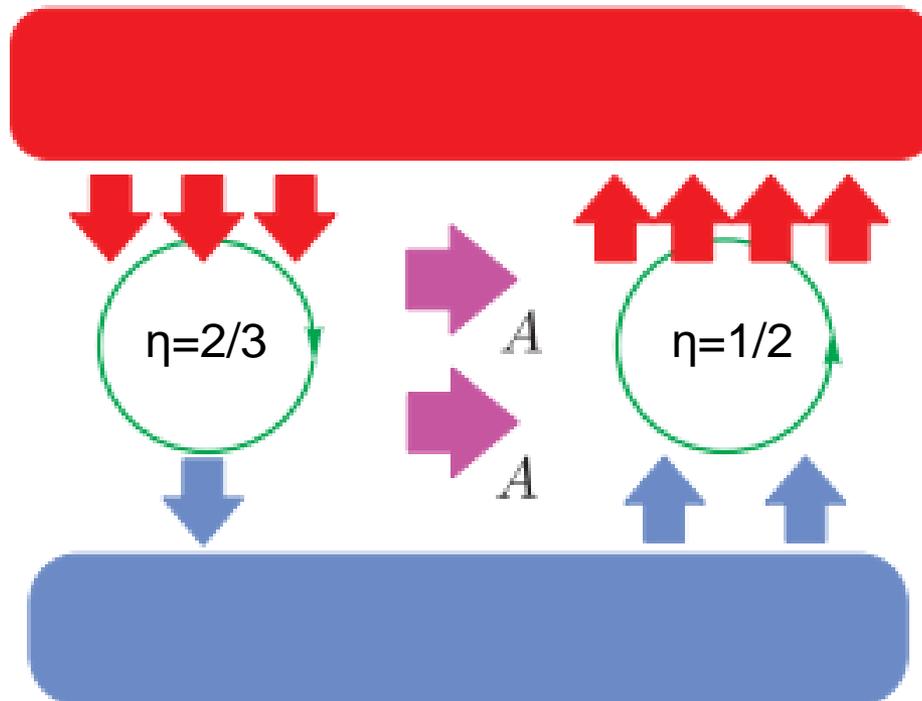
Теоремы Карно

- 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.



Кафедра общей физики

В понедельник **24 февраля 2025** года в аудитории **4-28** пройдет встреча сотрудников кафедры общей физики со студентами. Начало в **17:05**.

- Профессор Кокшаров Юрий Алексеевич
«Магнетизм и биология»
- Профессор Клавсюк Андрей Леонидович
«Формирование атомных структур на поверхности»