

# Молекулярная физика

---

## Лекция 5



# План лекции

- Процессы в идеальных газах
- Теплоемкость
- Циклические процессы
- Типы тепловых машин
- Коэффициент полезного действия
- Цикл Карно
- Реальные тепловые машины и их циклы

# Процессы в идеальных газах

**Термодинамический процесс** – изменение состояния системы (хотя бы одного ее параметра состояния) со временем.

**Равновесный процесс** – непрерывная последовательность равновесных состояний системы, которая может быть представлена на любой диаграмме (например,  $p - V$ ,  $V - T$ ,  $T - p$  и др.) в виде некоторой кривой процесса.

**Обратимый процесс** – процесс перехода термодинамической системы из одного состояния в другое, который может протекать как в прямом, так и обратном направлении через те же промежуточные состояния.

# Процессы в идеальных газах

**Уравнение процесса** – функциональная зависимость какого-либо параметра системы при изменении другого параметра в ходе равновесного процесса.

- **Изобарический процесс** (*Закон Гей-Люссака*)

$$P = \text{const} \text{ (давление)}$$

- **Изохорический процесс** (*Закон Шарля*)

$$V = \text{const} \text{ (объем)}$$

- **Изотермический процесс** (*Закон Бойля–Мариотта*)

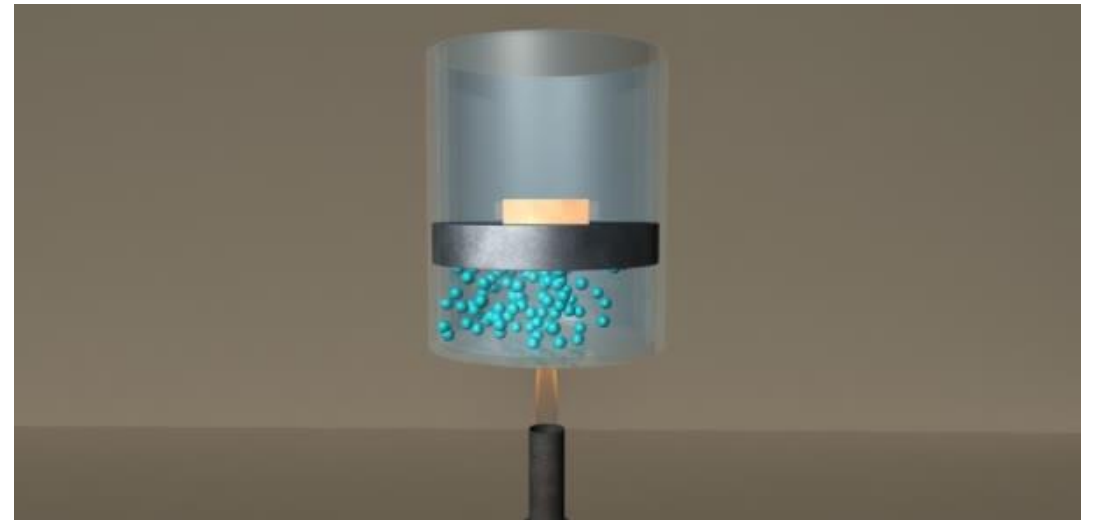
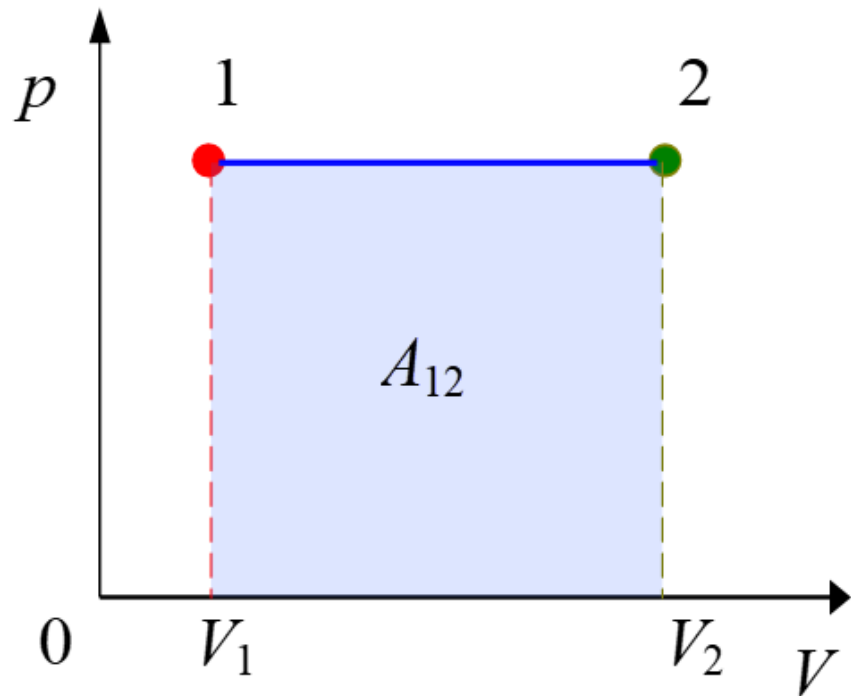
$$T = \text{const} \text{ (температура)}$$

**Элементарная механическая работа сил давления** – это работа, совершаемая системой при бесконечно малом изменении объема  $dV$  против сил внешнего давления.

# Изобарический процесс

**Изобарический процесс** (Закон Гей-Люссака)

$P = \text{const}$  (давление)

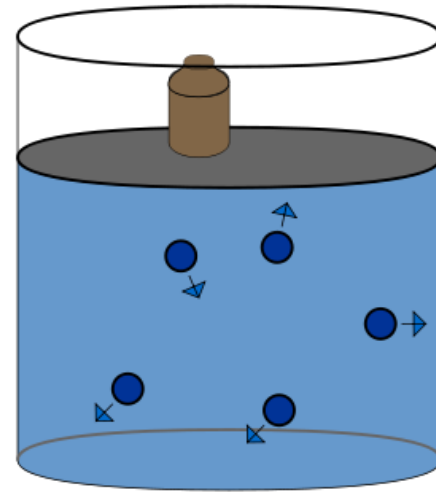
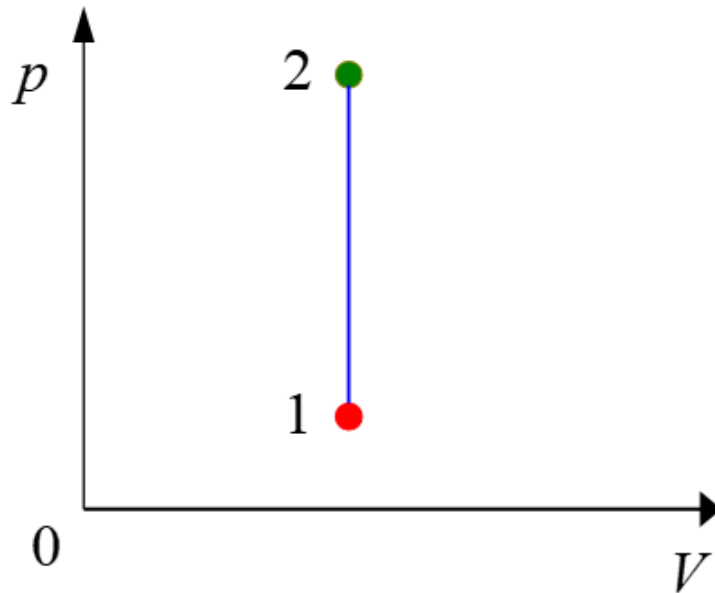


$$A_{12} = p_1(V_2 - V_1)$$

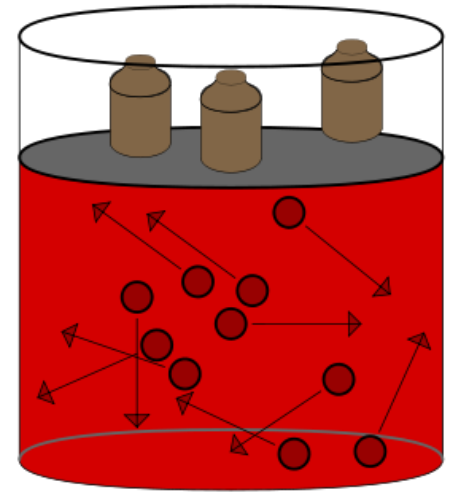
# Изохорический процесс

**Изохорический процесс (Закон Шарля)**

$V = \text{const}$  (объем)



Temperature  $T$



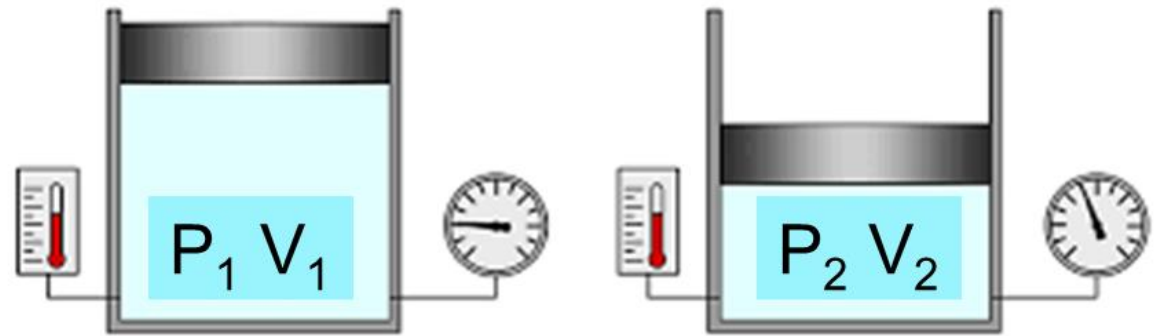
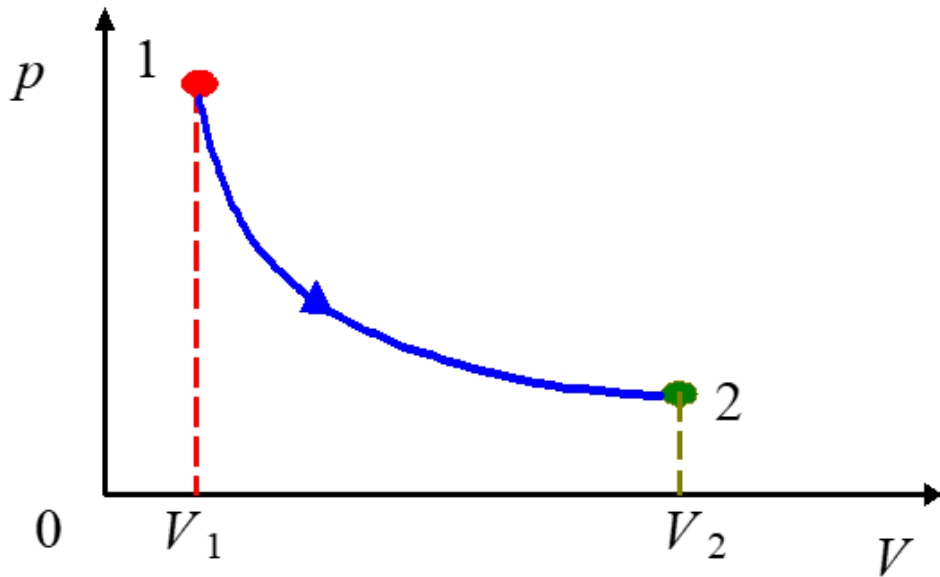
Temperature  $3T$

$$A_{12} = 0$$

# Изотермический процесс

**Изотермический процесс** (Закон Бойля–Мариотта)

$T = \text{const}$  (температура)



$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} RT \frac{dV}{V} = RT \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

# Теплоемкость

**Теплоемкость системы** – отношение количества теплоты  $\delta Q$ , которое следует подвести к системе, чтобы увеличить ее температуру на бесконечно малую величину  $dT$ , к этому изменению температуры.

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

**Удельная теплоемкость**

$$\bar{c} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}$$

**Молярная теплоемкость**

$$c = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT}$$



# Теплоемкость

**Теплоемкость идеального газа в изохорическом процессе**

$$c_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2}R$$

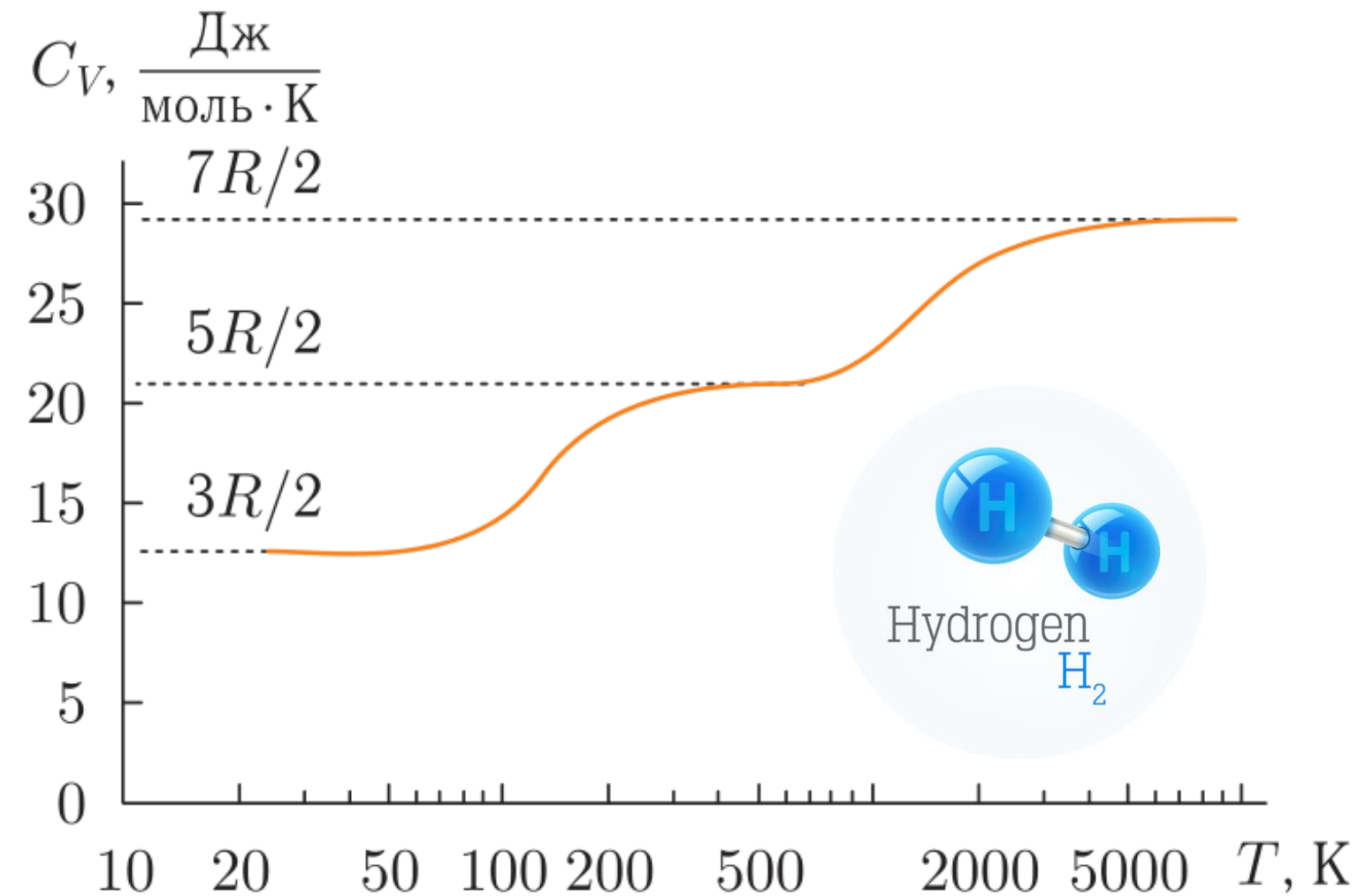
**Теплоемкость идеального газа в произвольном процессе**

$$c = \frac{\delta Q}{dT} = c_V + \left( \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p \right) \frac{dV}{dT}$$

**Формула Майера**

$$c_P = c_V + R$$

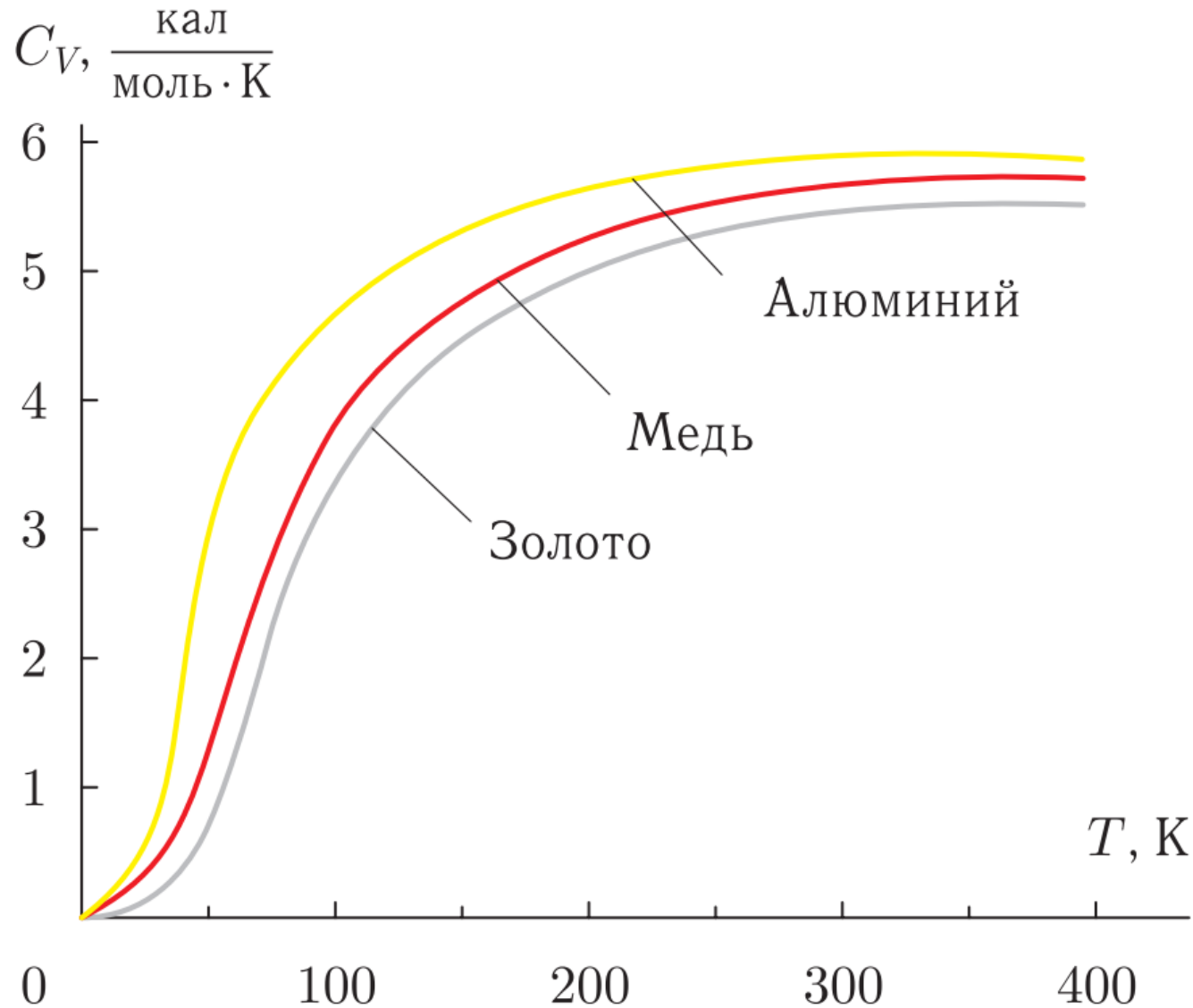
# Зависимость теплоемкости от температуры



При низкой температуре молекула водорода практически не вращается и ведет себя как точечная частица; при комнатной температуре начинает вращаться; при высокой температуре в ней возникают колебания атомов.

Из-за того, что число молекул в одном моле водорода, переходящих от одного режима движения к другому, с ростом температуры увеличивается постепенно, молярная теплоемкость изменяется плавно.

# Теплоемкость твердых тел



$$c_V = 3R$$

**Закон Дюлонга и Пти**

$$c_V \approx 230 N_A k \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3$$

**Закон Дебая**

# Адиабатический процесс

## Адиабатический процесс

$$\delta Q = 0$$

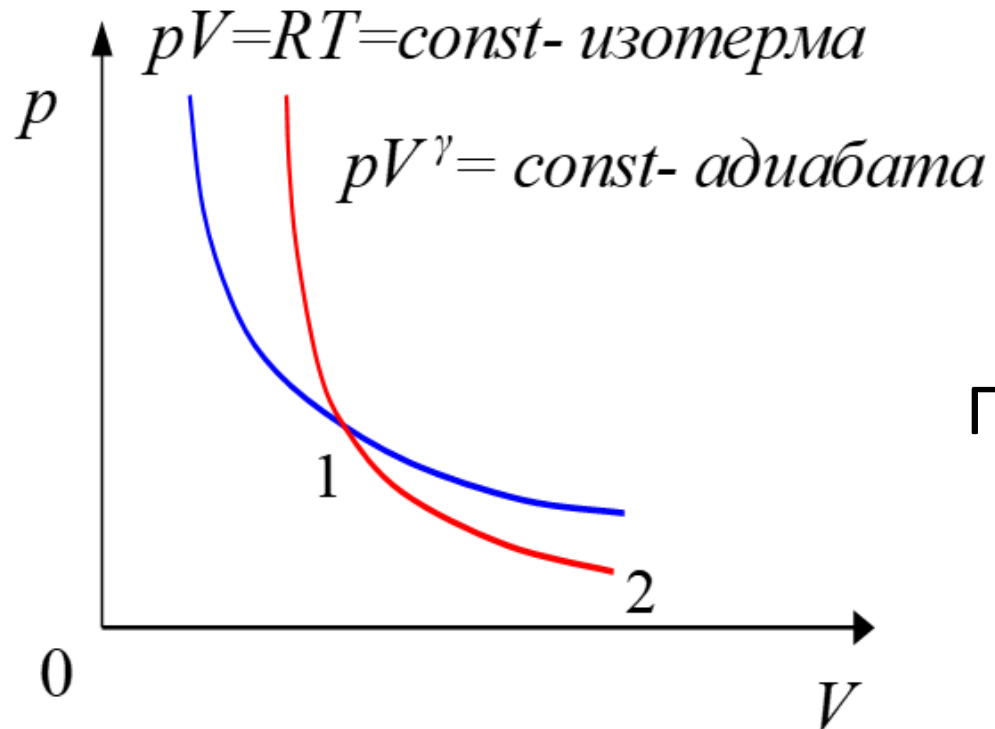
$$pV^\gamma = \text{const}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}$$

Показатель адиабаты  $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$

$$A_{12} = -c_V(T_2 - T_1)$$



# Политропический процесс

**Политропический процесс** — это процесс, происходящий при постоянной теплоемкости  $c = \text{const}$ .

$$pV^n = p_0V_0^n = \text{const}$$

$$TV^{n-1} = T_0V_0^{n-1} = \text{const}$$

Показатель политропы  $n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$

# Политропические процессы

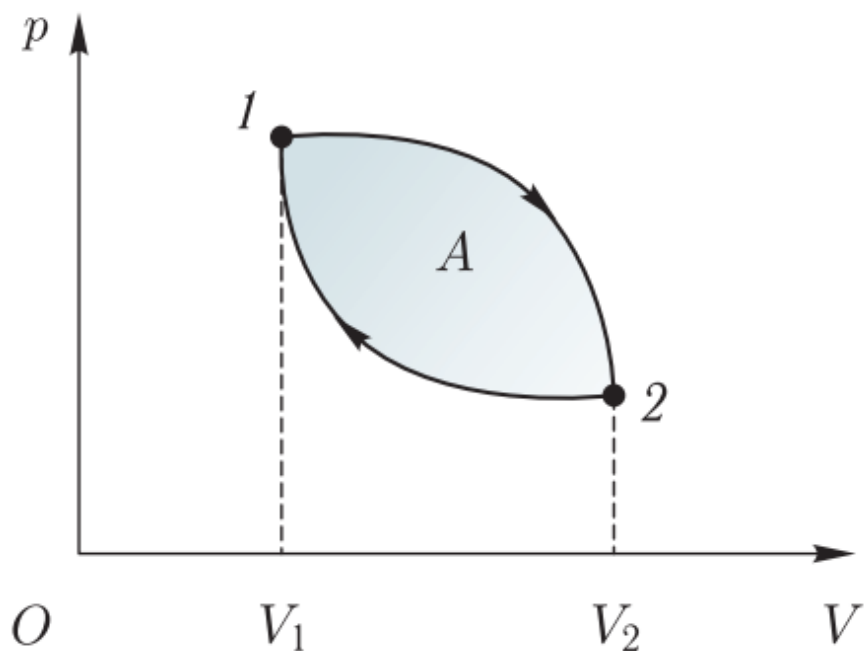
Процесс	$n$	$c$
$p = \text{const}$	?	$c_P$
$V = \text{const}$	?	$c_V$
$T = \text{const}$	?	?
$\delta Q = 0$	$\gamma$	?

# Циклические процессы

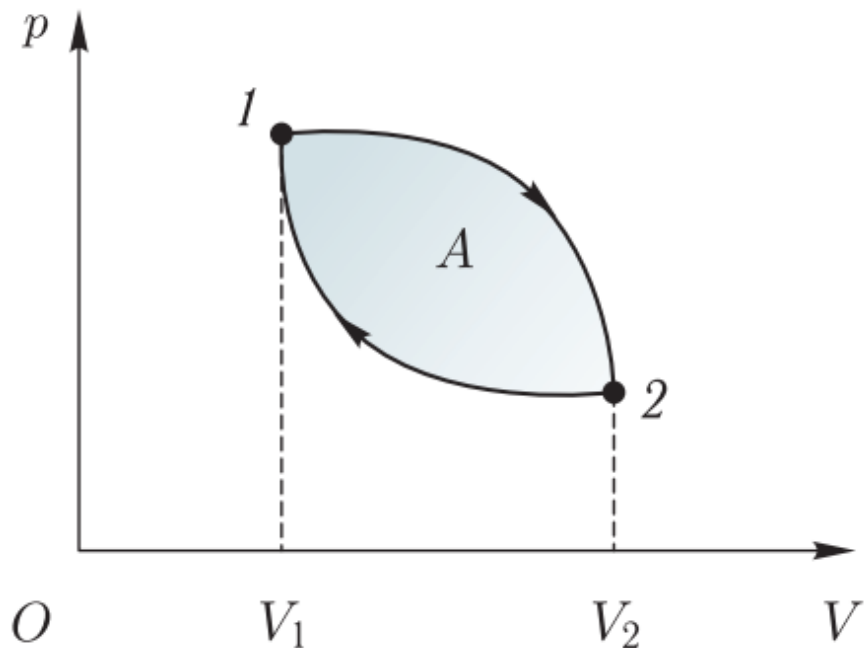
**Циклический процесс (круговой цикл)** – процесс, в результате которого термодинамическая система (рабочее вещество), изменяя свое состояние, в конце возвращается в исходное состояние.

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

Цикл может осуществляться как «по 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 термодинамическая система 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

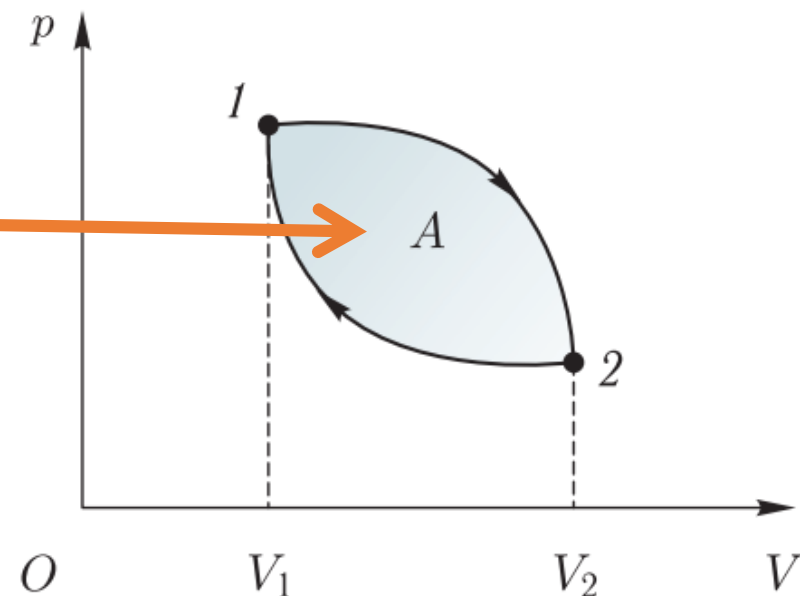
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV + \int_{V_2}^{V_1} p dV = \oint p dV$$

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.

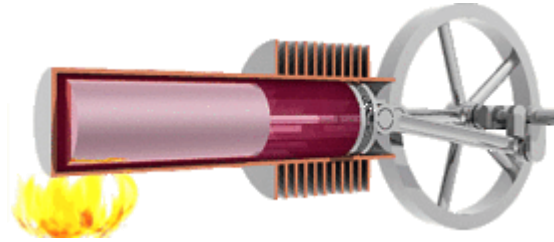
- Согласно первому началу термодинамики для обратимых процессов:

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

- 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



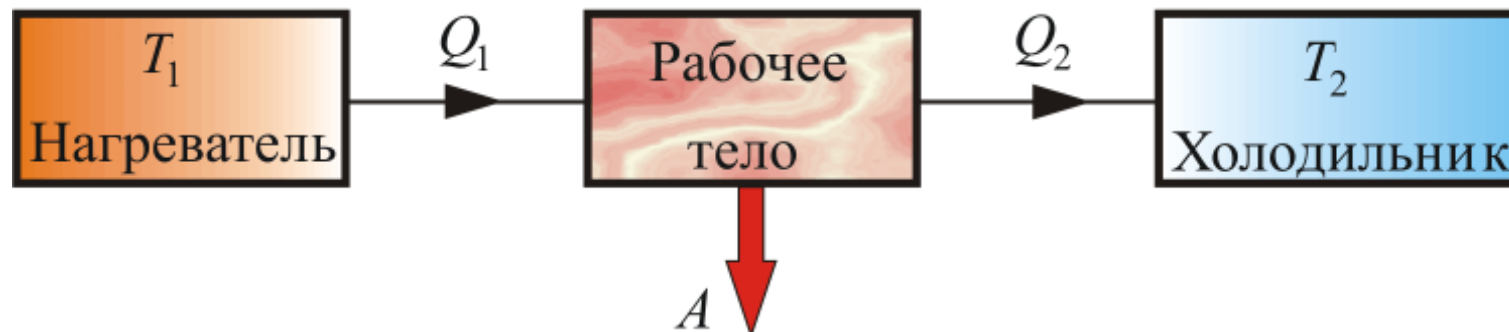
# Коэффициент полезного действия

Эффективность тепловой машины характеризуется **коэффициентом полезного действия (КПД)**, определяемым как

$$\eta = \frac{A}{Q_+} = 1 + \frac{Q_-}{Q_+}$$

$$\eta = \frac{\text{Польза}}{\text{Затраты}}$$

Возникает принципиальный вопрос: можно ли достичь величины  $\eta = 1$ ?  
Ответ на этот вопрос даст второе начало термодинамики.



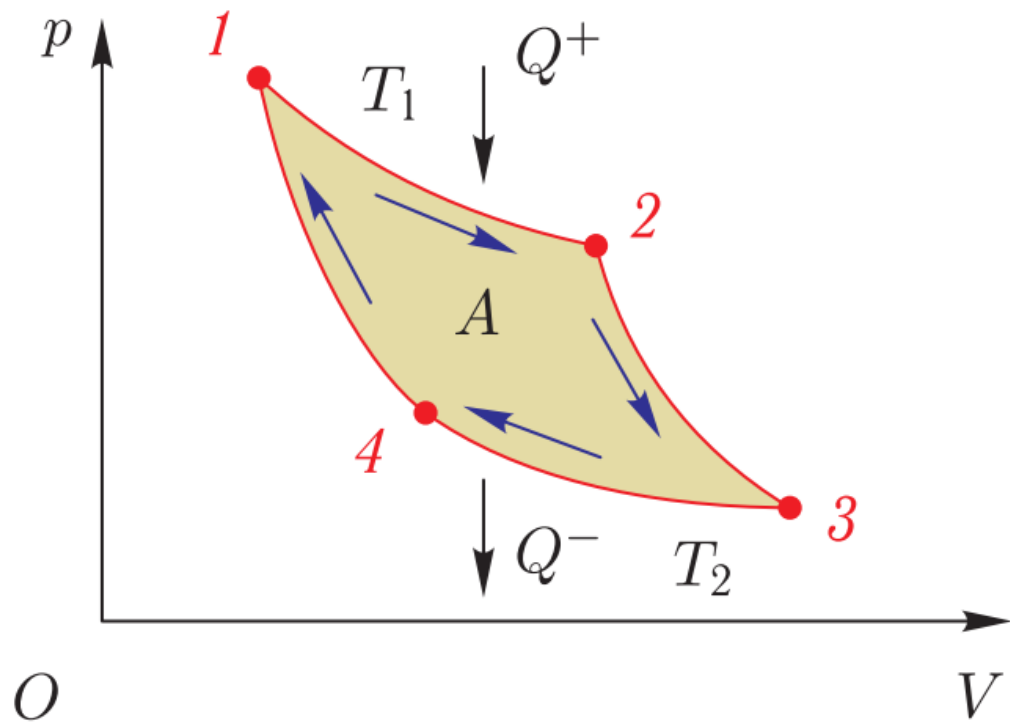
# Цикл Карно

Французский физик С. Карно, базируясь 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.

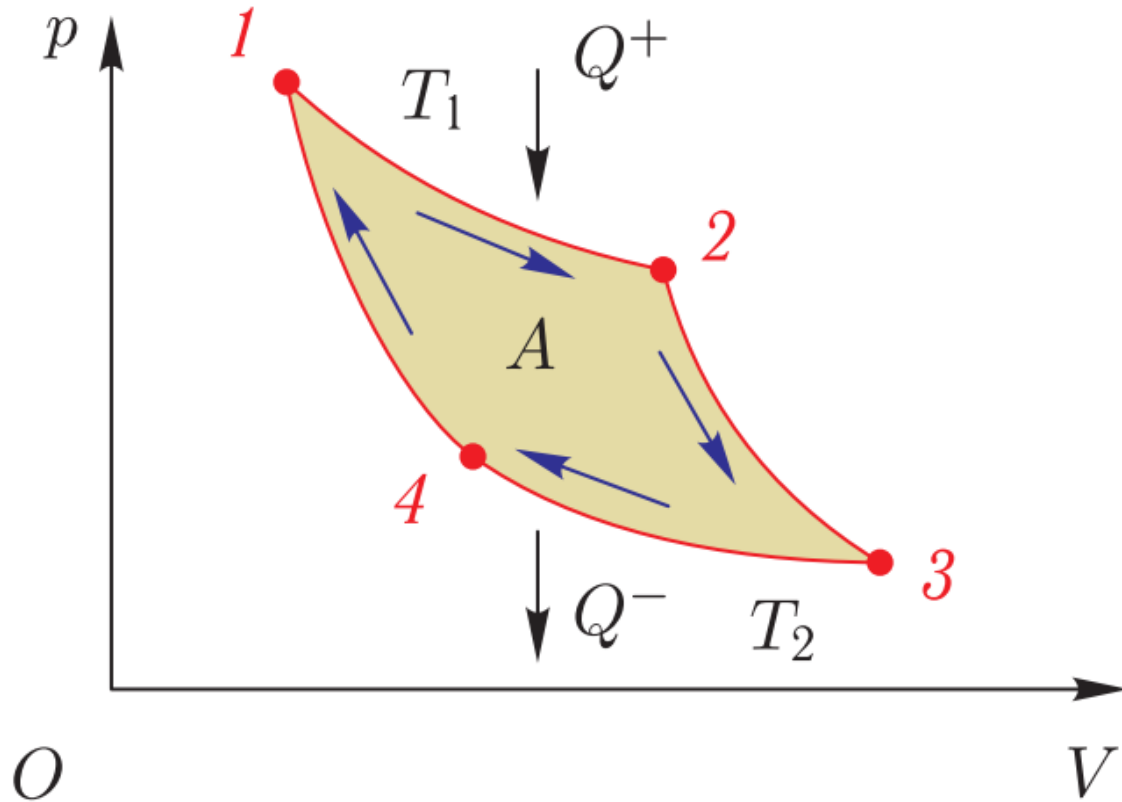
**1-2** изотермическое расширение рабочего тела при температуре  $T_1$ , которое получает теплоту  $Q^+$  от нагревателя.

**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  $T_1$ .

# КПД цикла Карно



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

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

# Холодильные машины



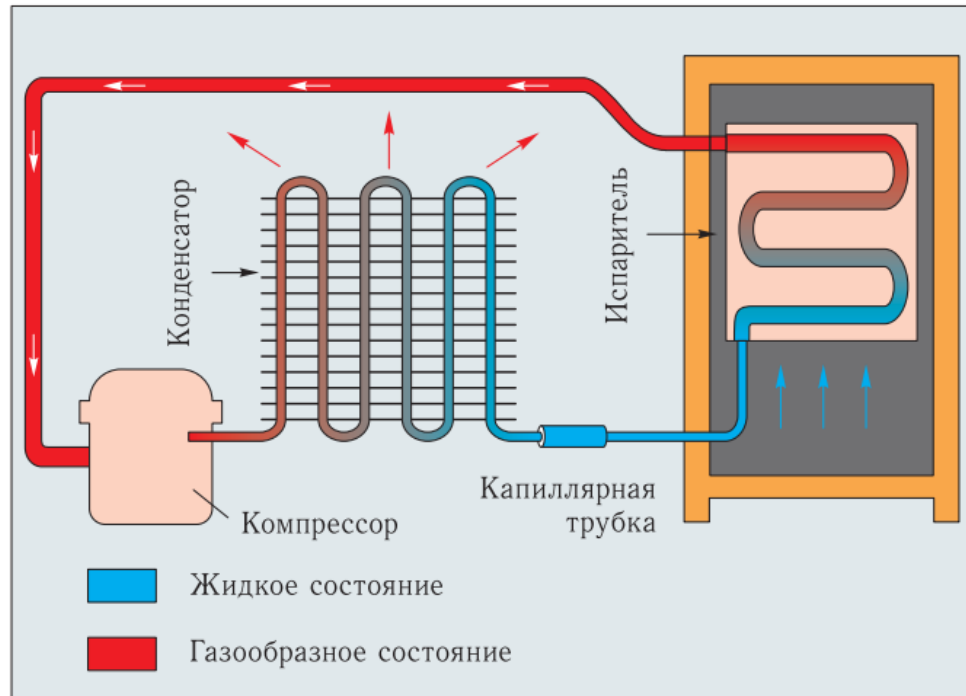
Холодильный коэффициент

$$\eta_{\text{X}} = \frac{|Q_{-}|}{A_{\text{ВН}}} = \frac{|Q_{-}|}{Q_{+} - |Q_{-}|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

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



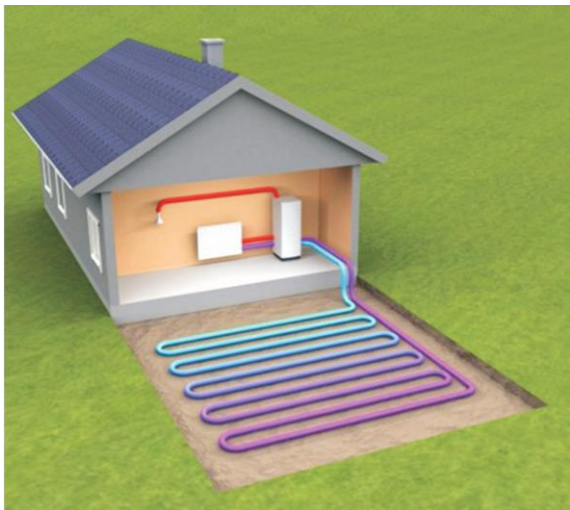
**Компрессор** засасывает из испарителя холодные пары хладагента и, сжав их, выталкивает в **конденсатор**. При этом температура сжатого пара увеличивается. **Хладагент** — вещество, переносящее теплоту от испарителя к конденсатору. В конденсаторе пары остывают, и пар превращается в жидкость. Остывший жидкий хладагент под давлением через дросселирующее отверстие (капилляр) поступает в **испаритель**, где за счет резкого уменьшения давления происходит испарение жидкости.

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

# Тепловой насос

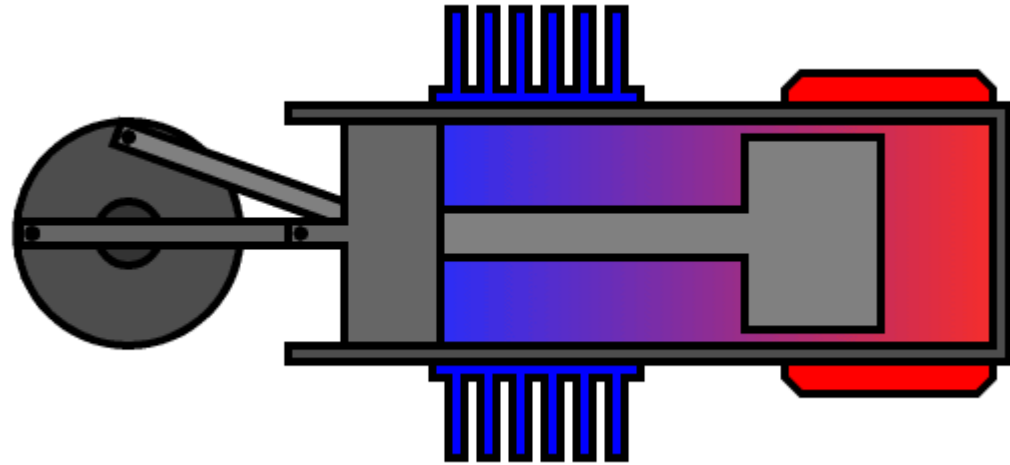
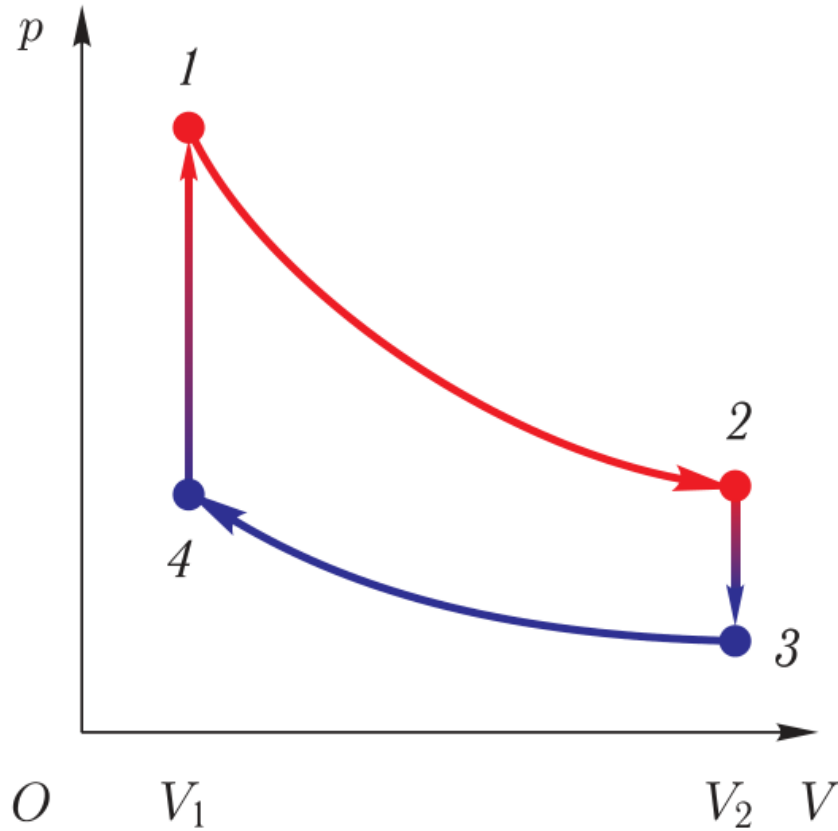
**Тепловой насос** — устройство для переноса тепловой энергии от источника с низкой температурой к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой.

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



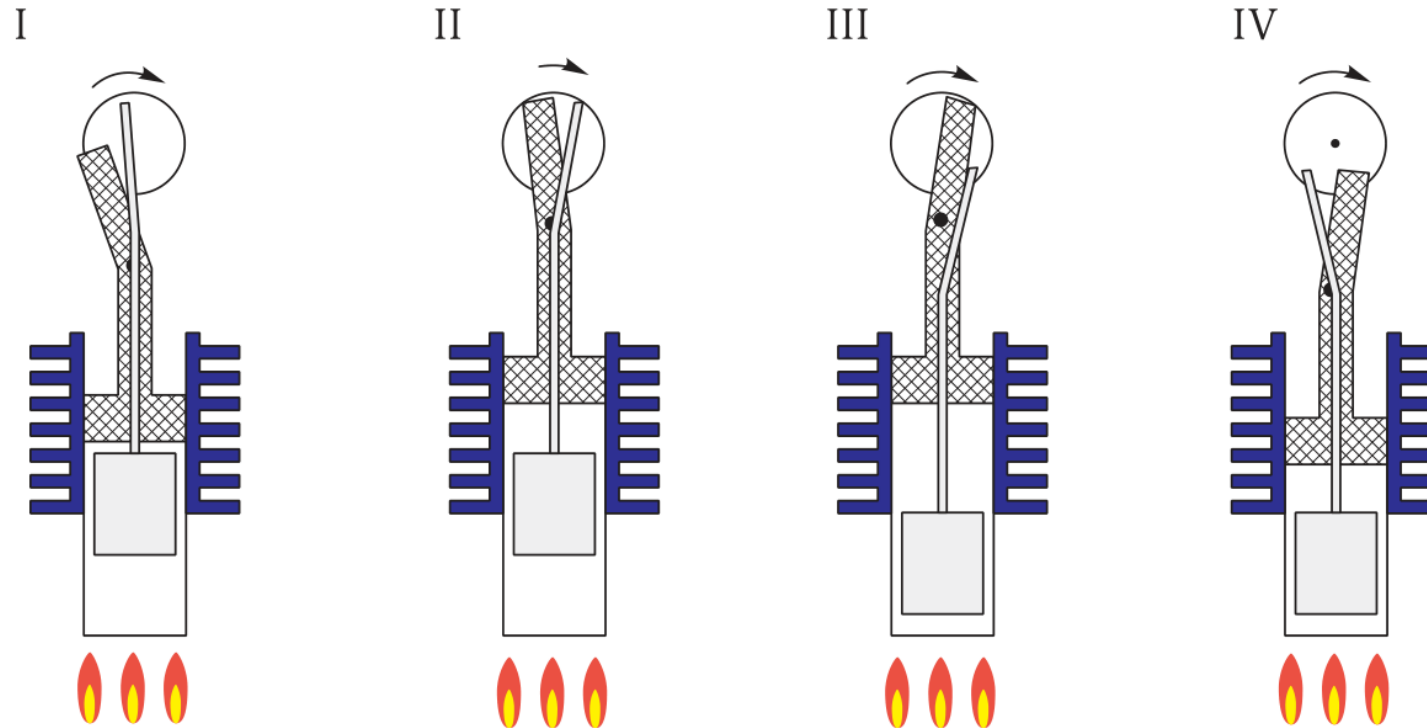
$$\eta_{TP} = \frac{|Q_+|}{A_{BH}} = \frac{|Q_+|}{Q_+ - |Q_-|} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

# Двигатель Стирлинга



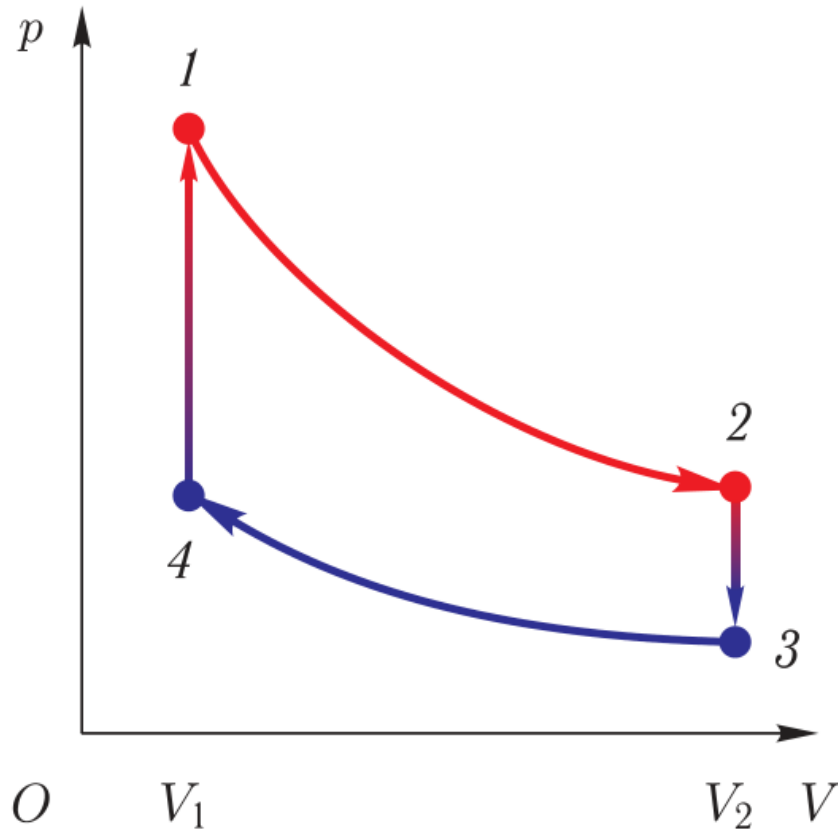
В XIX веке инженеры хотели создать безопасную замену паровым двигателям, котлы которых часто взрывались из-за высоких давлений пара и неподходящих материалов для их постройки. В 1816 г. шотландским священником Р. Стирлингом был запатентован двигатель, который оказался не только безопасным, но и несравненно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

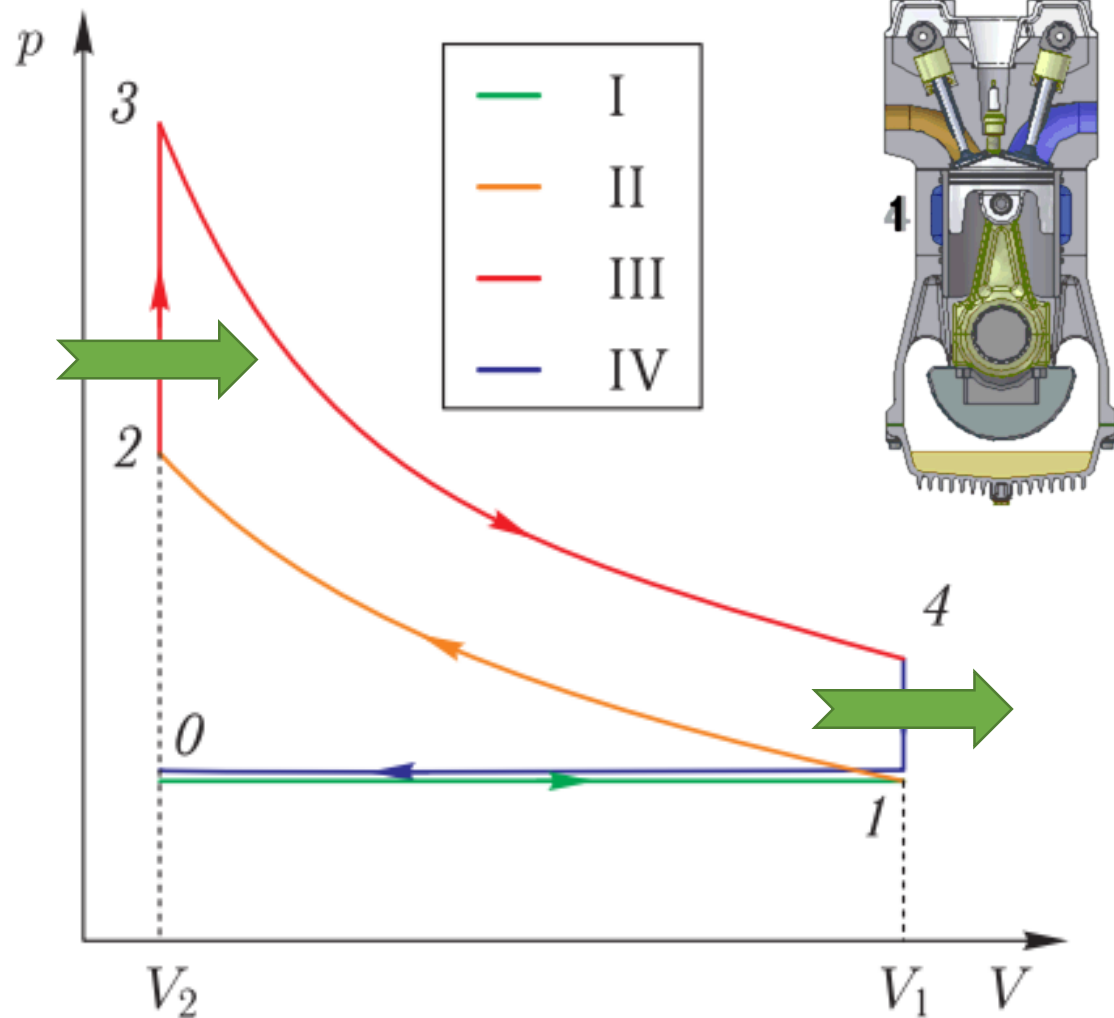
# Цикл Стирлинга



$$\eta = \frac{Q_+ + Q_-}{Q_+} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{c_V(T_1 - T_2)}{R \ln(V_2/V_1)}}$$

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.

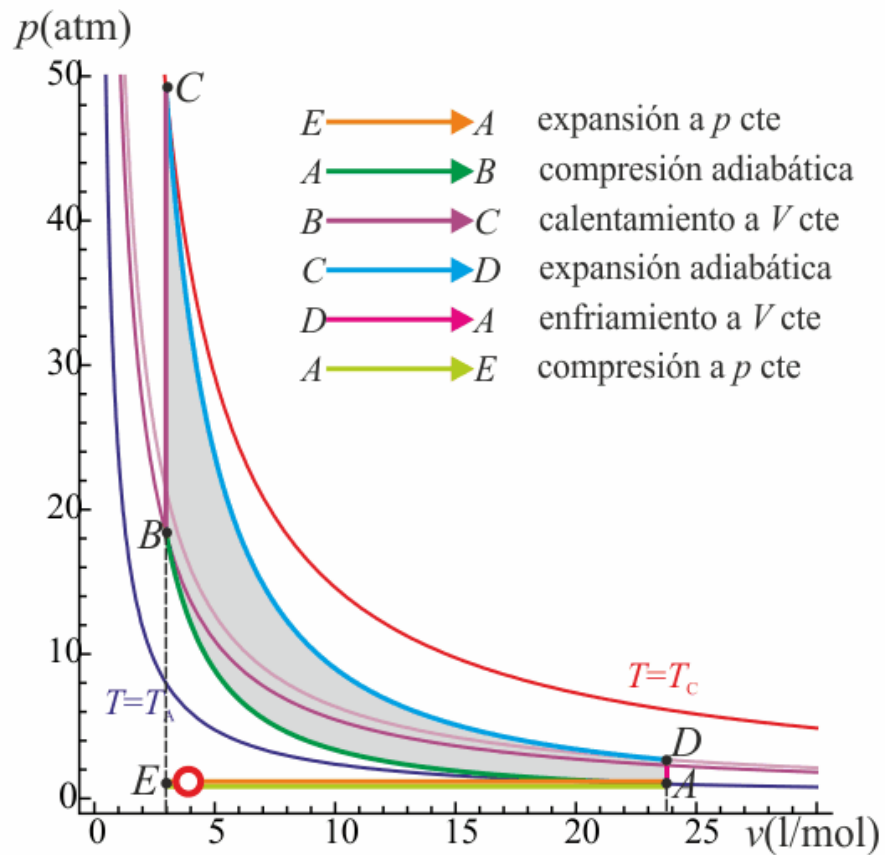
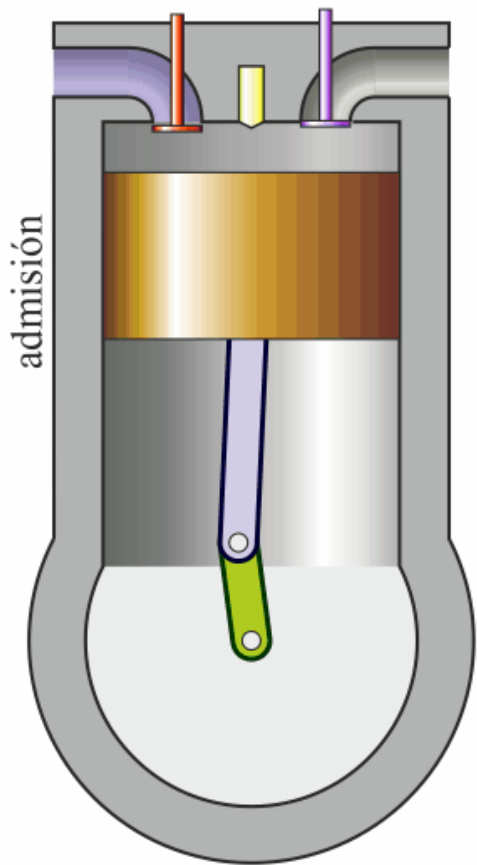
# Цикл Отто



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

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

**Цикл Отто** — термодинамический цикл, описывающий рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания с воспламенением сжатой смеси от постороннего источника энергии, **цикл бензинового двигателя**. Назван в честь немецкого инженера Николауса Отто.

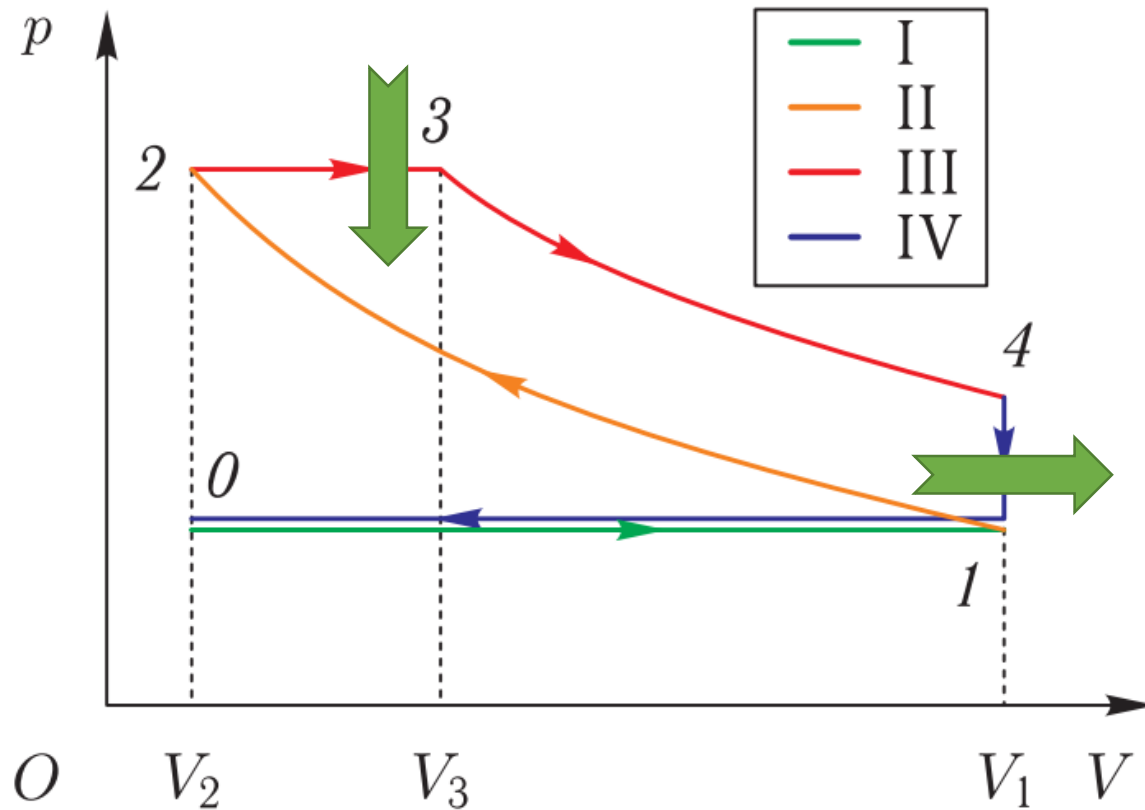


$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

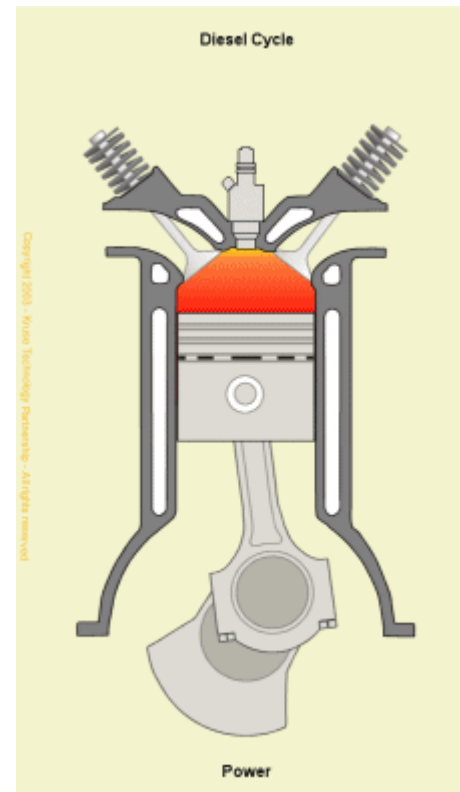
У современных двигателей  $V_1/V_2 = 10$ . Полагая  $\gamma = 1.4$ , получаем  $\eta = 0,6$ .

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.

# Цикл Дизеля



$$\eta = 1 + \frac{Q_-}{Q_+} = 1 + \frac{c_V(T_1 - T_4)}{c_P(T_3 - T_2)}$$



**Цикл Дизеля** — термодинамический цикл, описывающий рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания с воспламенением впрыскиваемого топлива от разогретого рабочего тела (сжатого поршнем воздуха), **цикл дизельного двигателя.**



# Тепловой взрыв

## КОЛЕБАНИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

«Пушка» на моторе  
(изохорический нагрев газа).

# Адиабатическое охлаждение

## **КОЛЕБАНИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**Образование тумана.**