

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*)

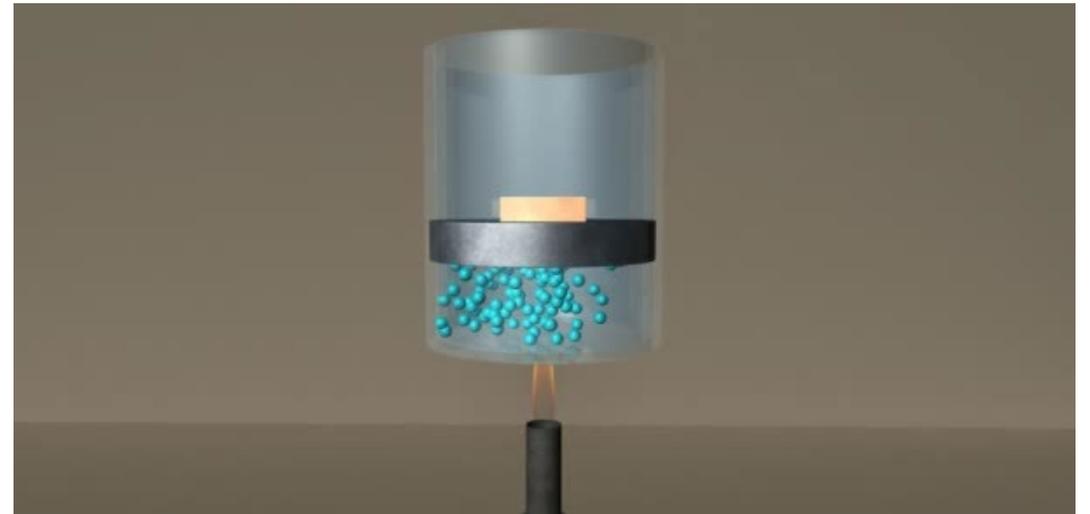
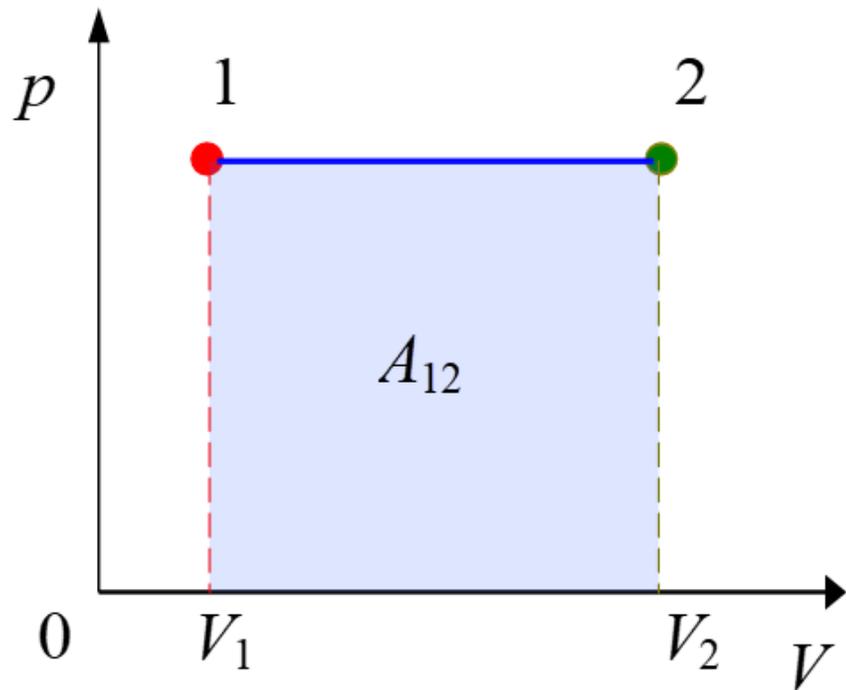
$$T = \text{const} \text{ (температура)}$$

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)

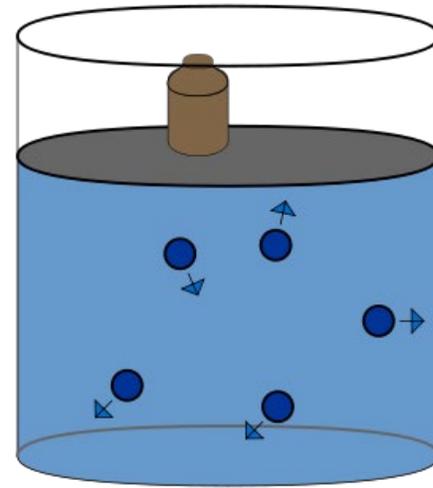
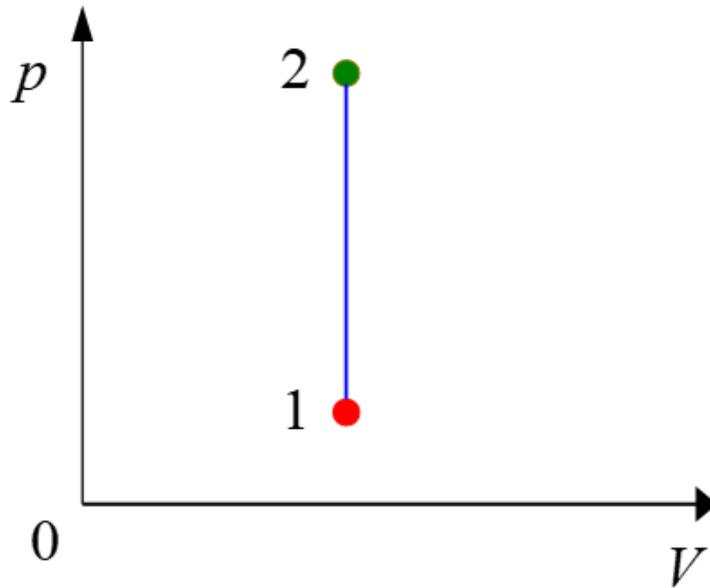


$$A_{12} = p_1(V_2 - V_1)$$

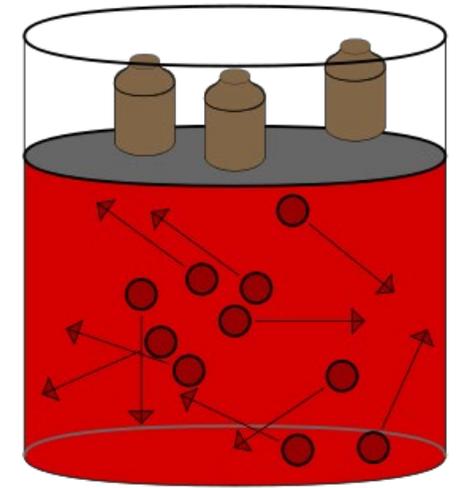
Изохорический процесс

Изохорический процесс (*Закон Шарля*)

$V = \text{const}$ (объем)



Temperature T



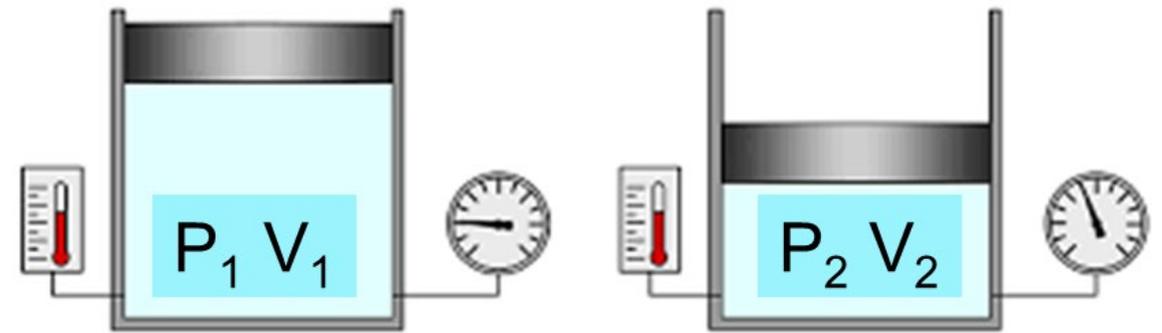
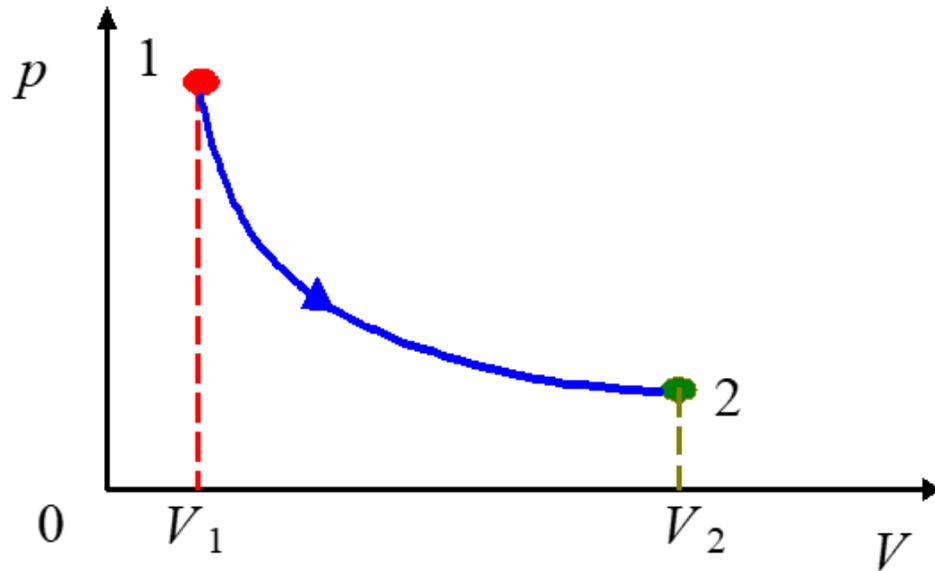
Temperature $3T$

$$A_{12} = 0$$

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 δQ , 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

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

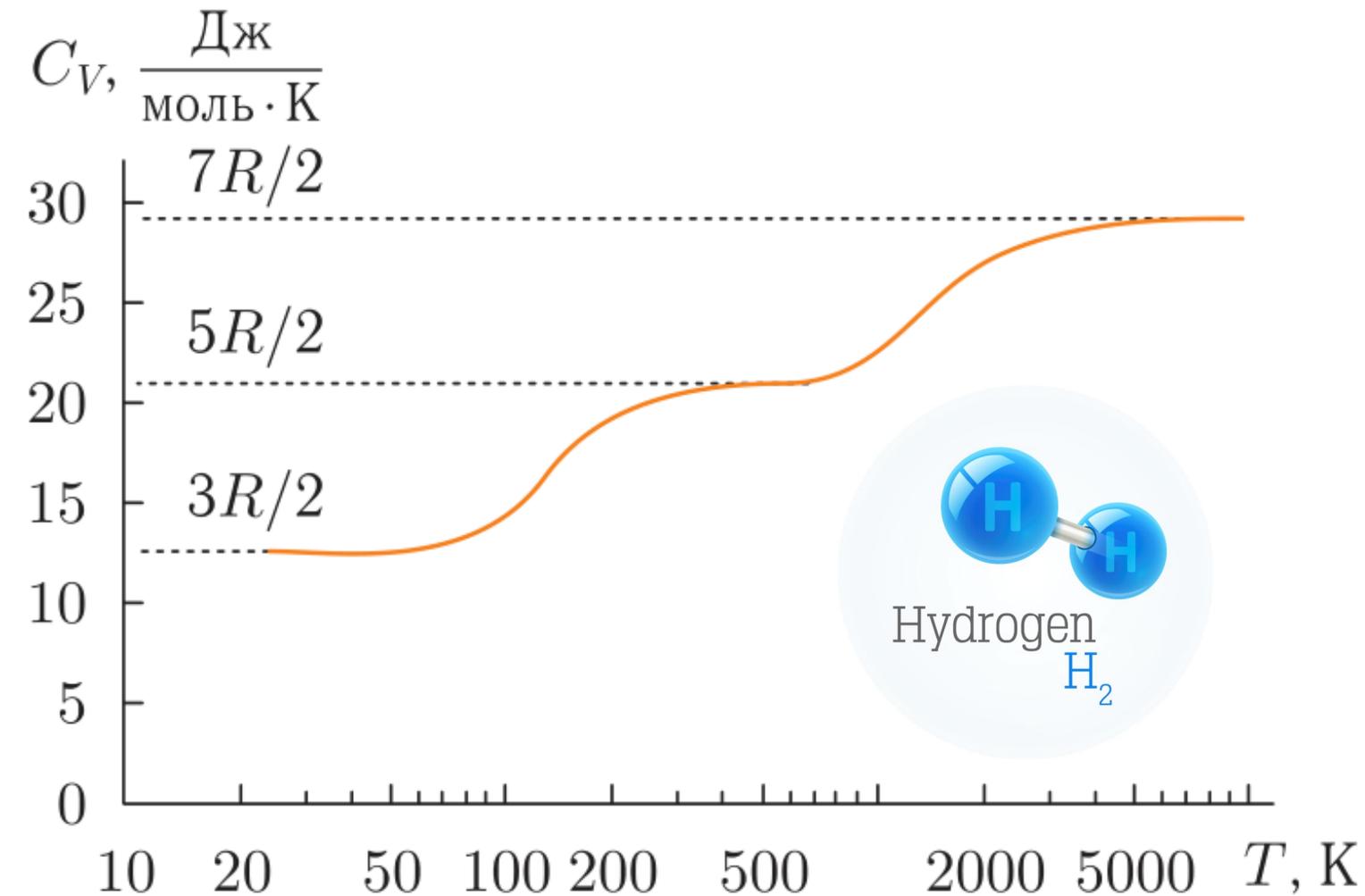
Теплоемкость идеального газа в произвольном процессе

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

Формула Майера

$$c_P = c_V + R$$

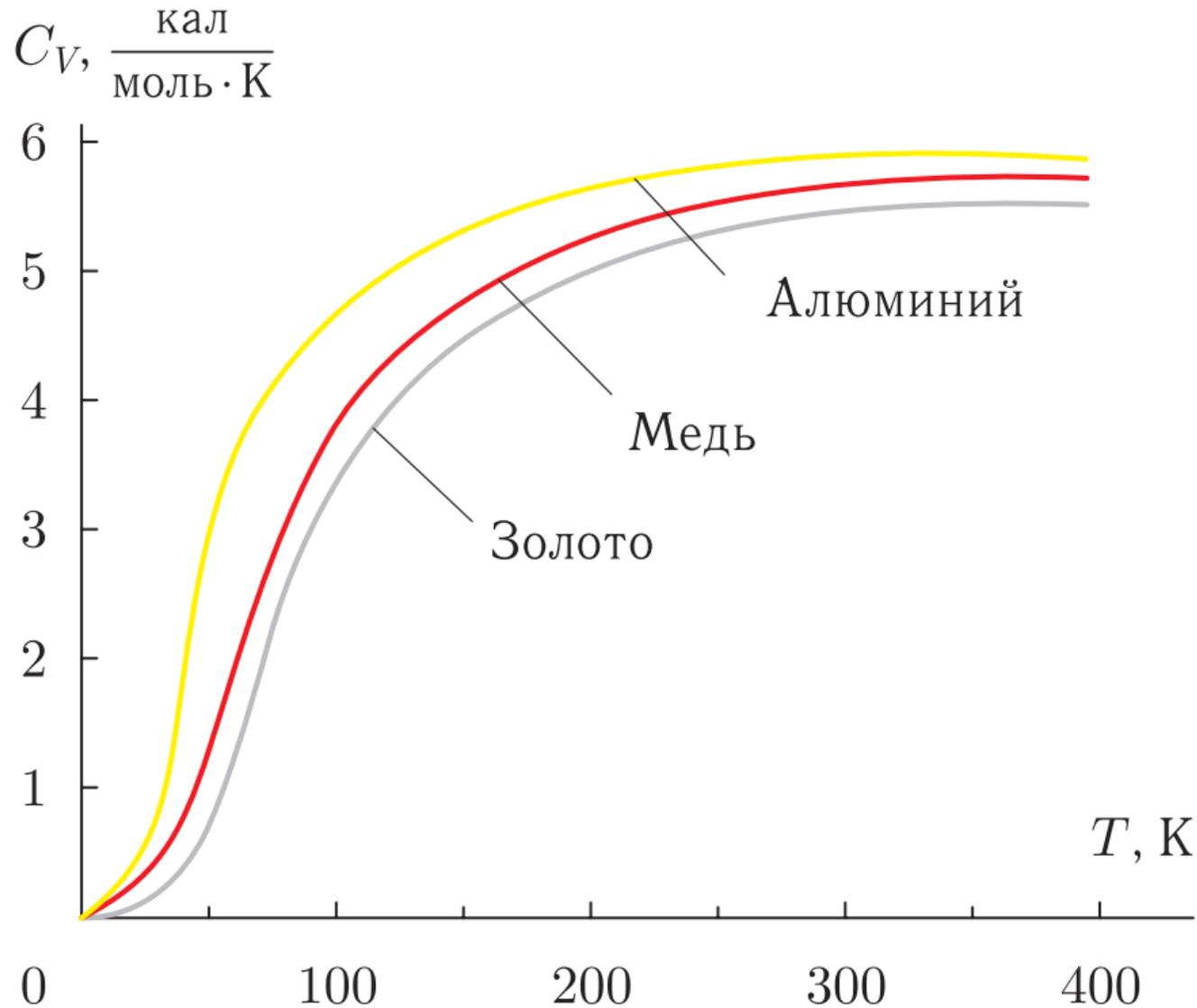
Зависимость теплоемкости от температуры



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

$$\delta Q = 0$$

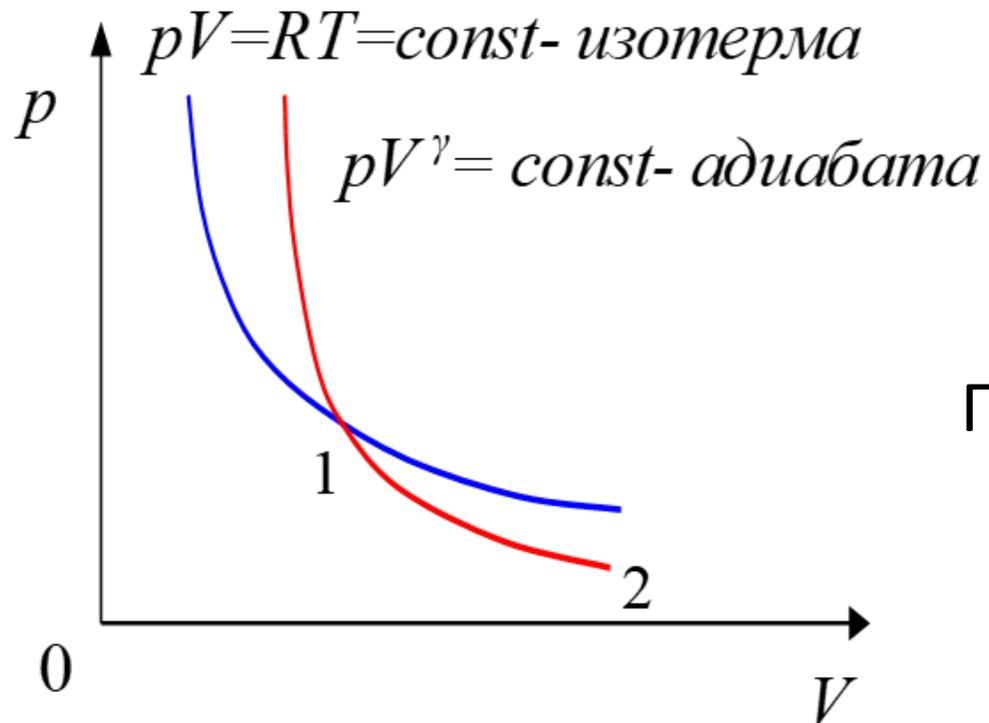
$$pV^\gamma = \text{const}$$

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

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

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

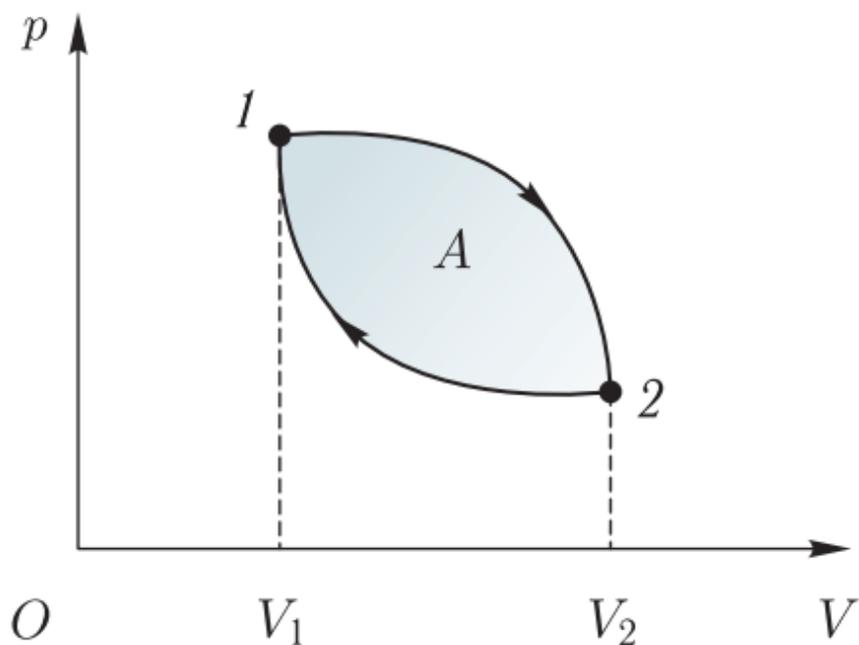
Процесс	n	c
$p = \text{const}$?	c_P
$V = \text{const}$?	c_V
$T = \text{const}$?	?
$\delta Q = 0$	γ	?

Циклические процессы

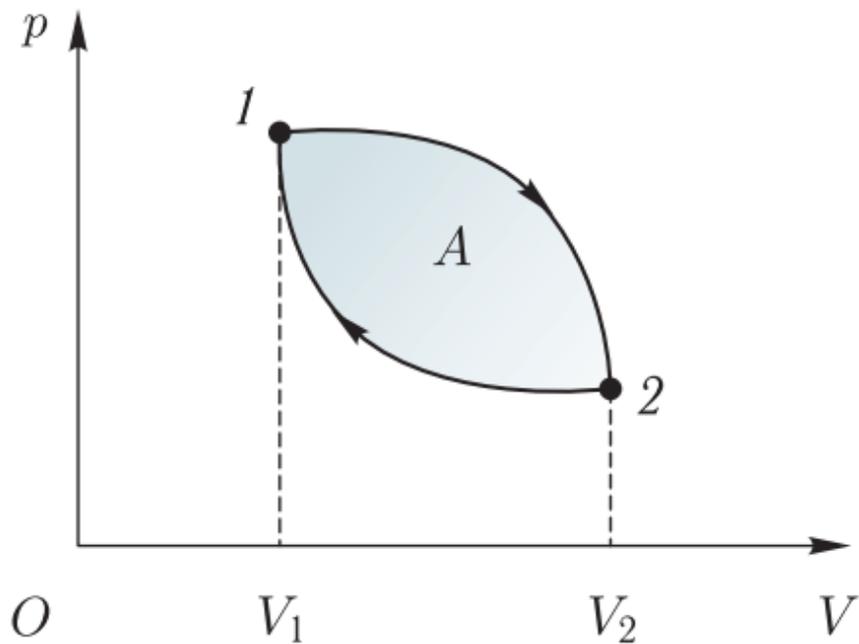
Циклический процесс (круговой цикл) – процесс, в результате которого термодинамическая система (рабочее вещество), изменяя свое состояние, в конце возвращается в исходное состояние.

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

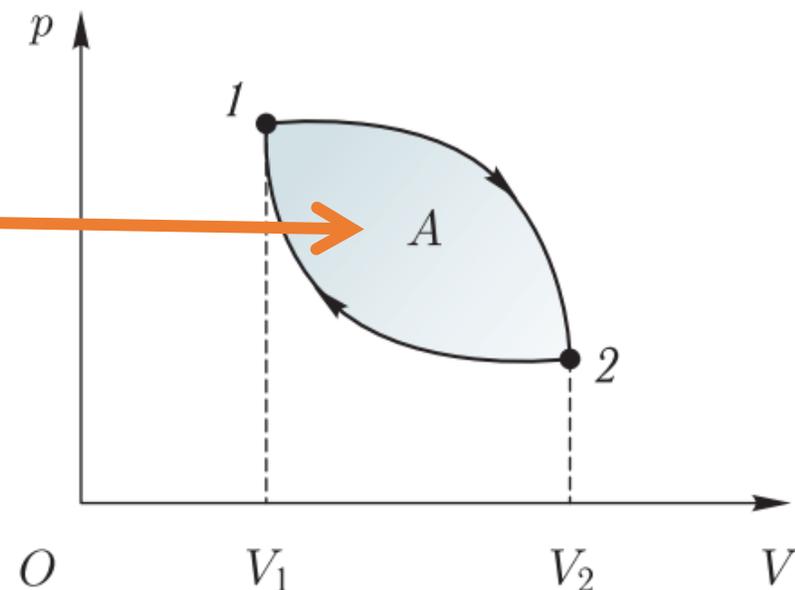
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV + \int_{V_2}^{V_1} p dV = \oint p dV$$

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.

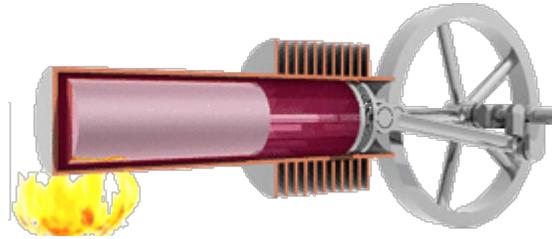
- Согласно первому началу термодинамики для обратимых процессов:

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

- 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



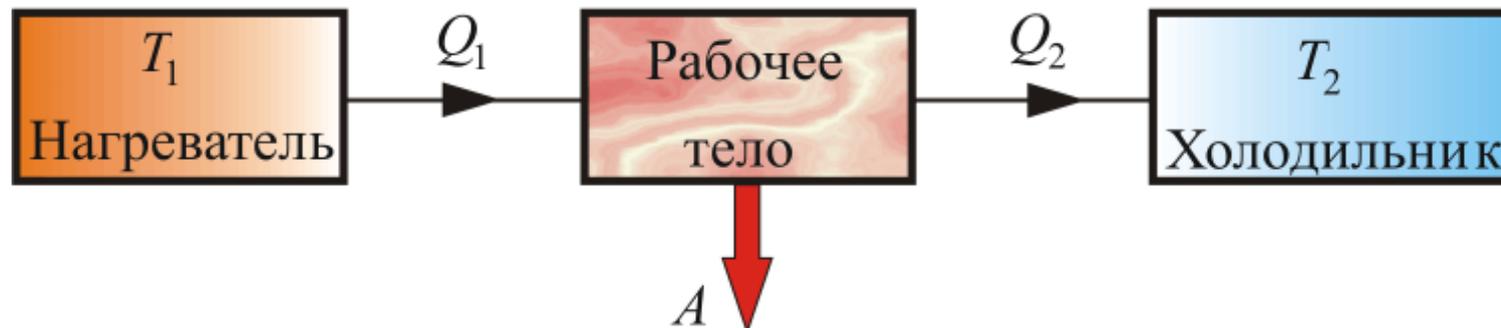
Коэффициент полезного действия

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.



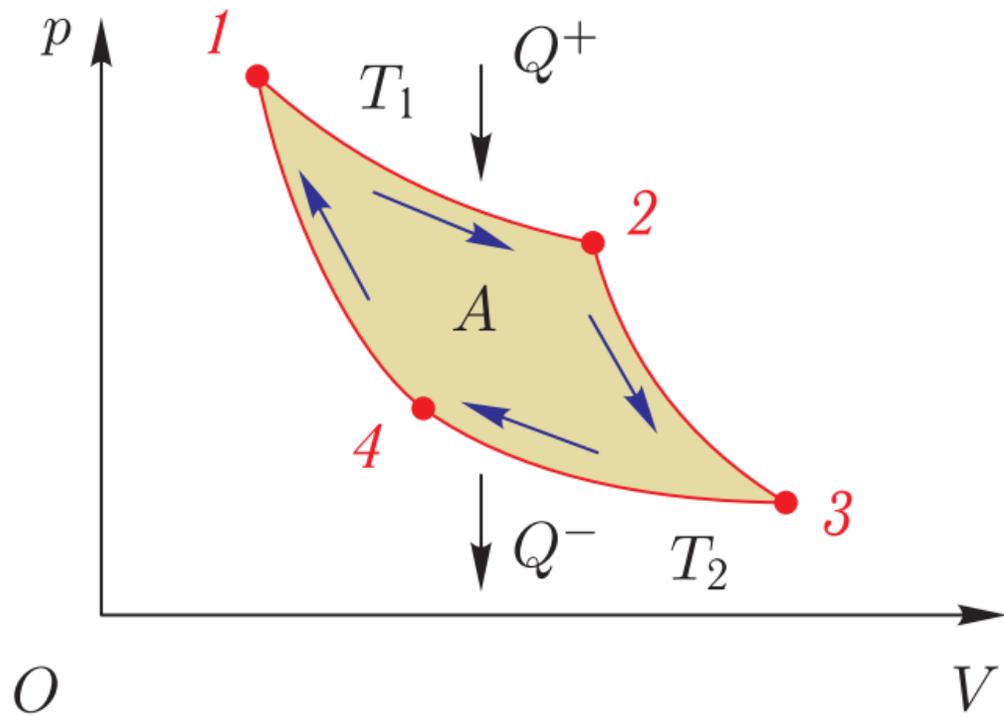
Цикл Карно

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.

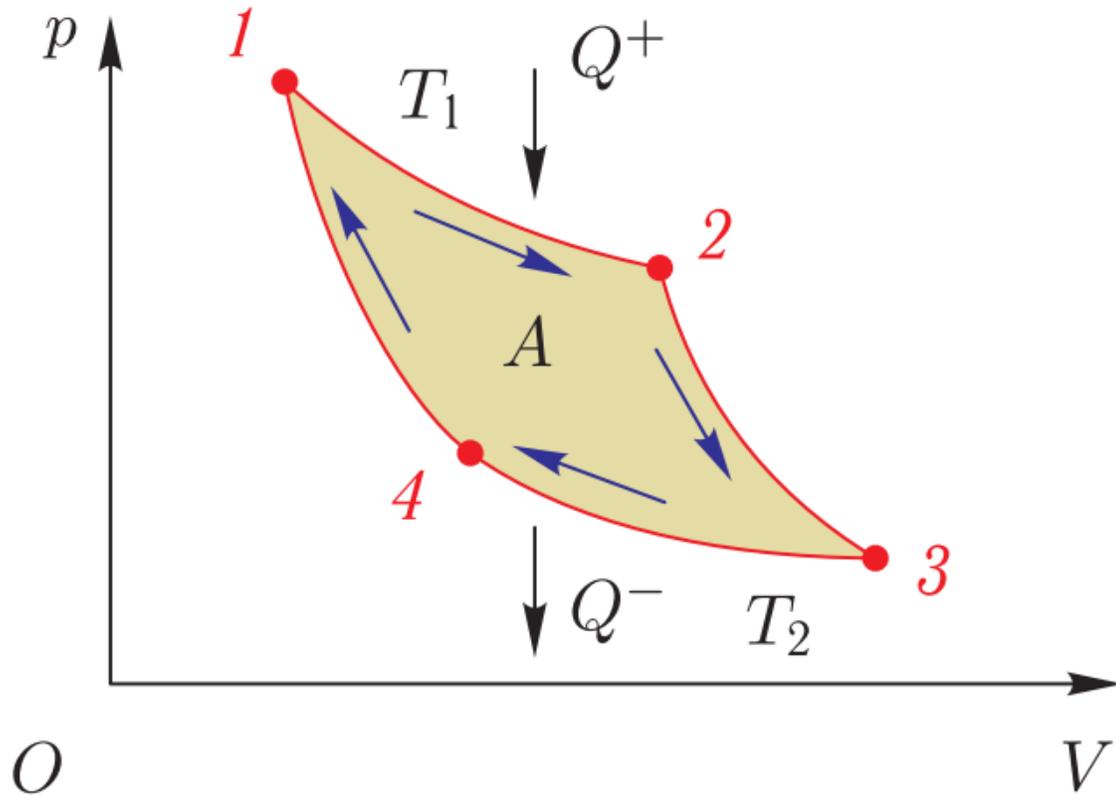
1-2 изотермическое расширение рабочего тела при температуре T_1 , которое получает теплоту Q^+ от нагревателя.

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 .

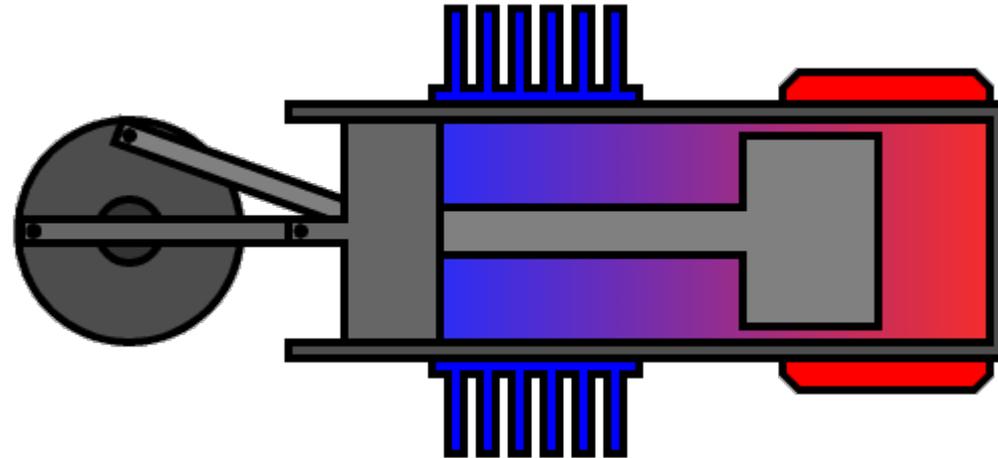
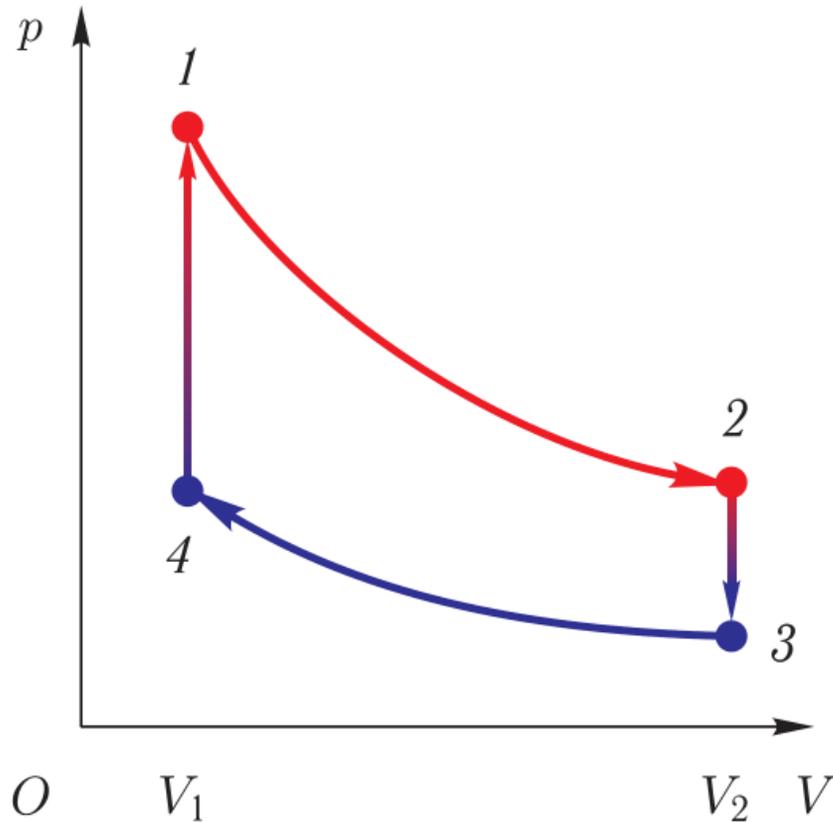
КПД цикла Карно



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

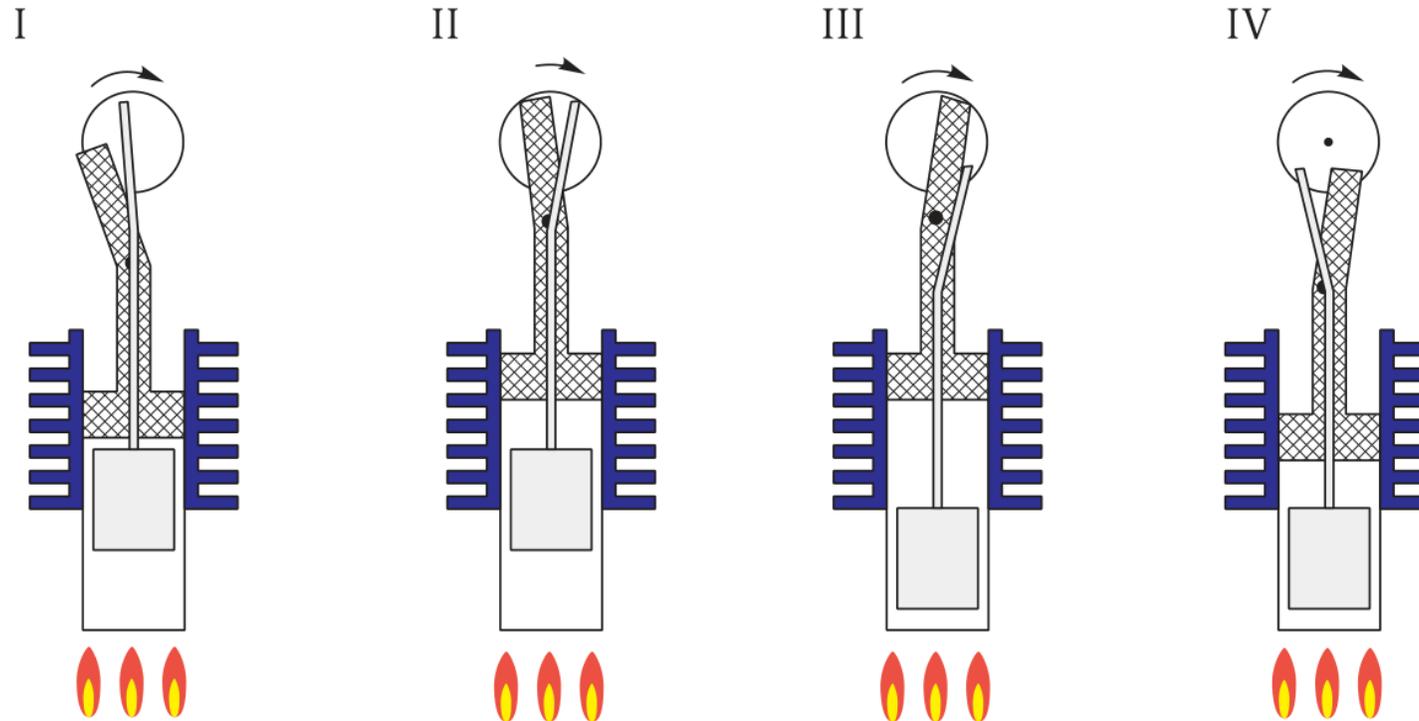
КПД любой обратимой машины Карно определяется формулой выше и **не зависит** от вида рабочего тела и конструкции машины.

Двигатель Стирлинга



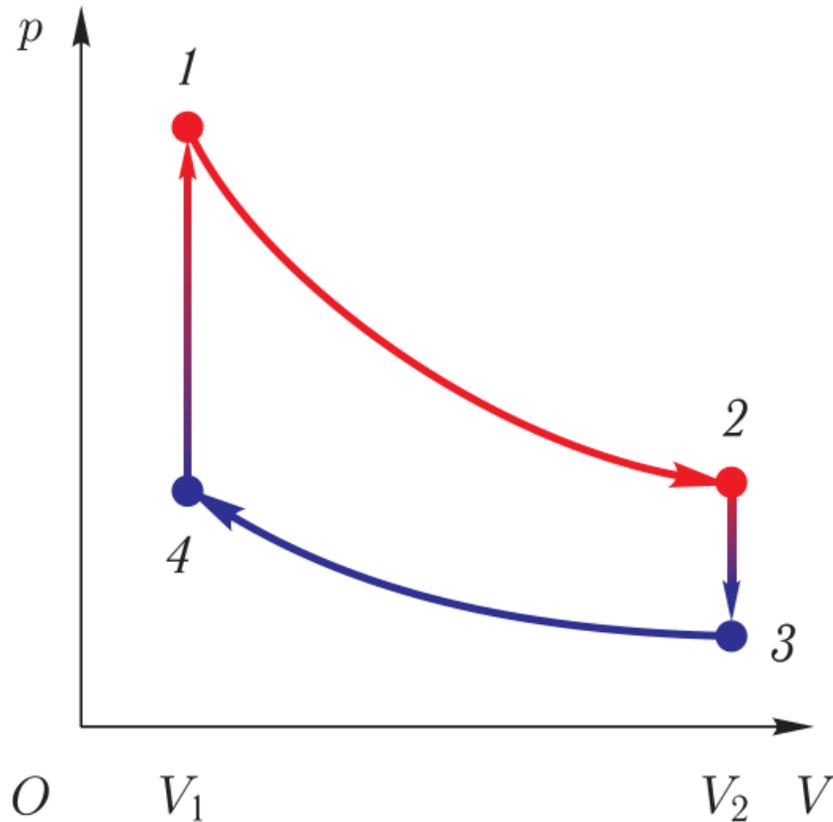
В XIX веке инженеры хотели создать безопасную замену паровым двигателям, котлы которых часто взрывались из-за высоких давлений пара и неподходящих материалов для их постройки. В 1816 г. шотландским священником Р. Стирлингом был запатентован двигатель, который оказался не только безопасным, но и несравненно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

Холодильные машины

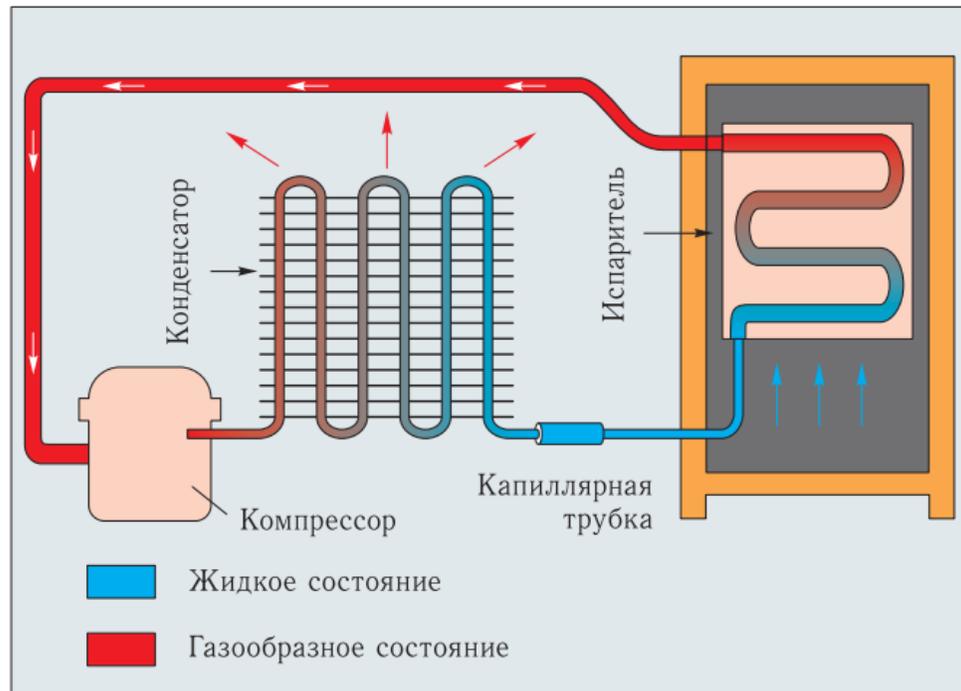


Холодильный коэффициент

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

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



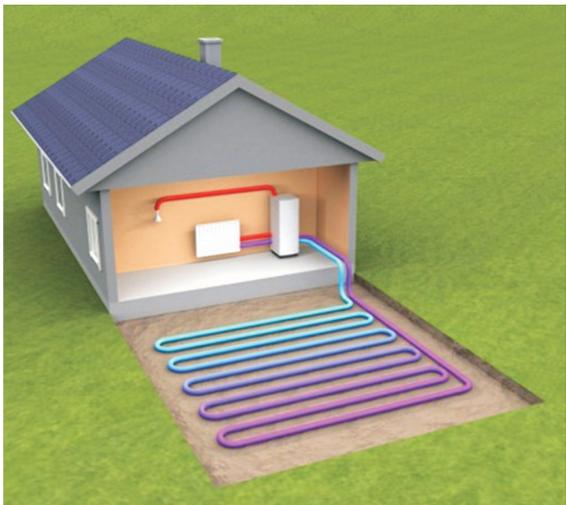
Компрессор засасывает из испарителя холодные пары хладагента и, сжав их, выталкивает в **конденсатор**. При этом температура сжатого пара увеличивается. **Хладагент** — вещество, переносящее теплоту от испарителя к конденсатору. В конденсаторе пары остывают, и пар превращается в жидкость. Остывший жидкий 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

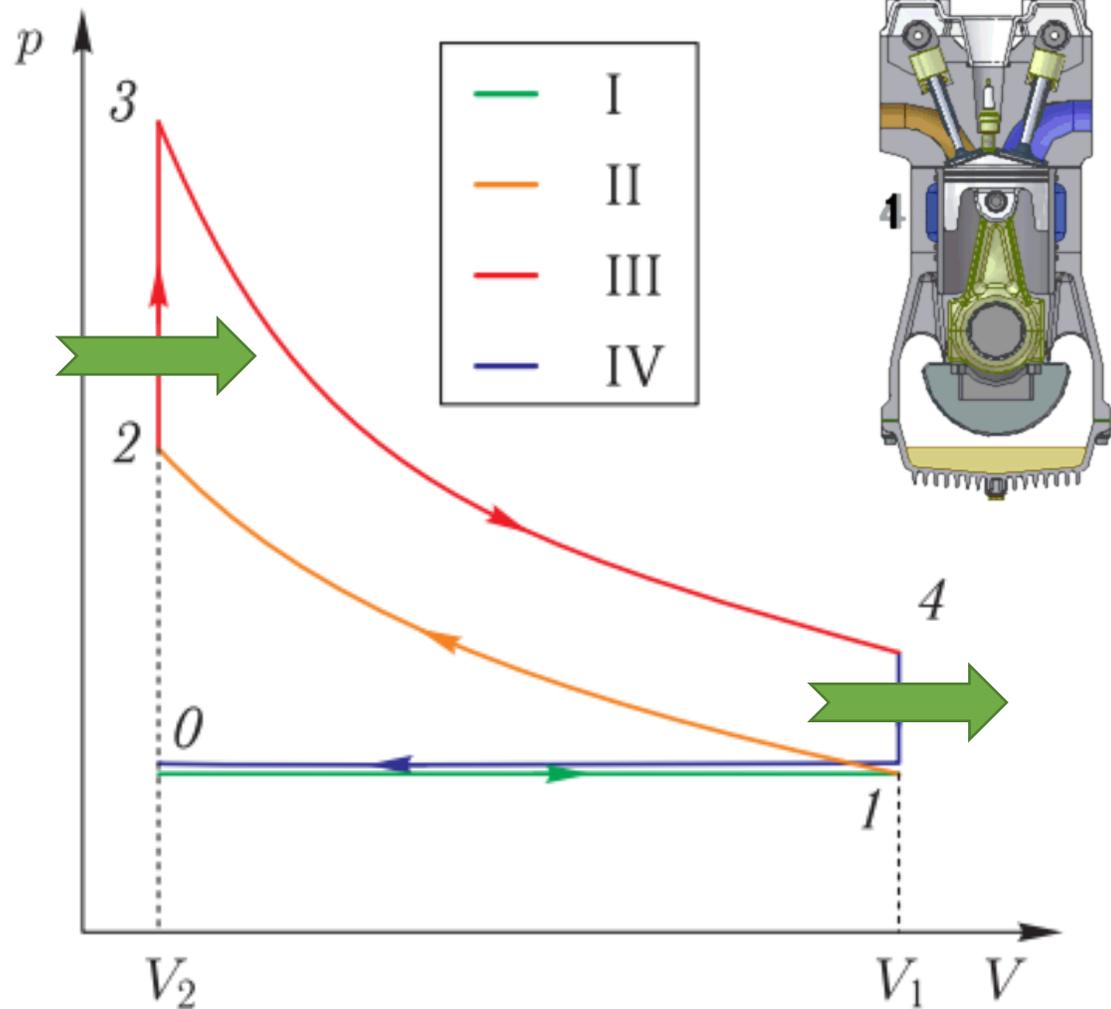
Тепловой насос — устройство для переноса тепловой энергии от источника с низкой температурой к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой.

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



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

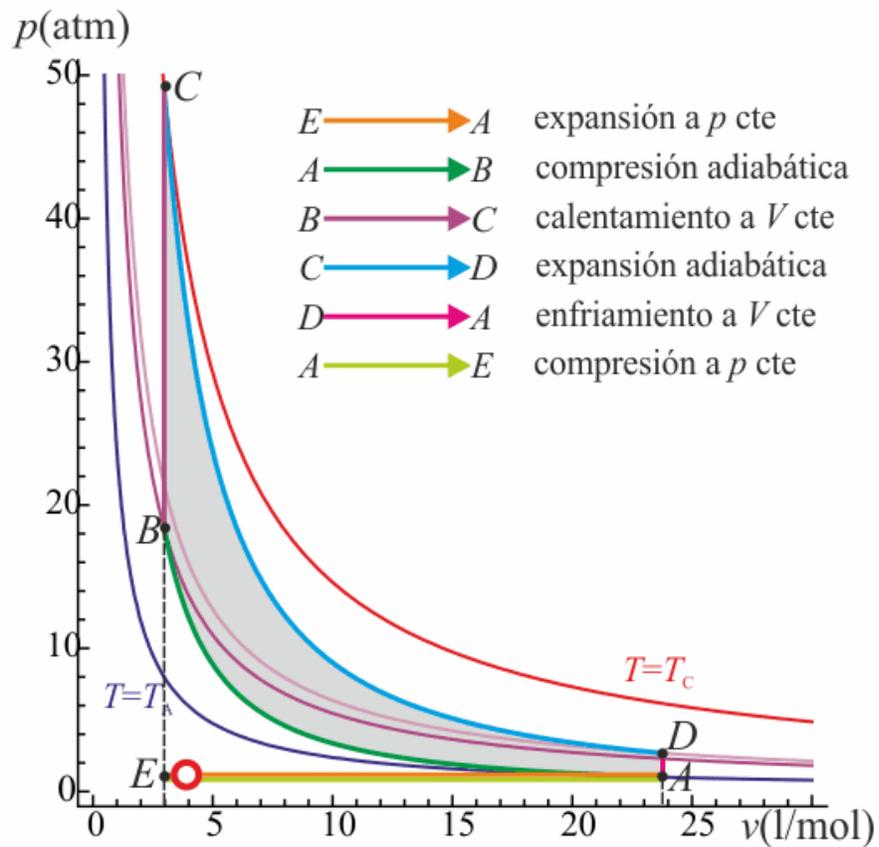
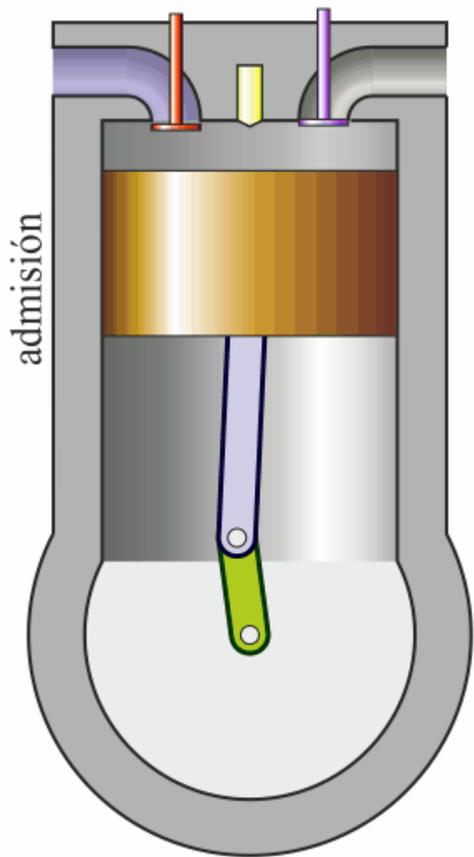
Цикл Отто



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

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

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.

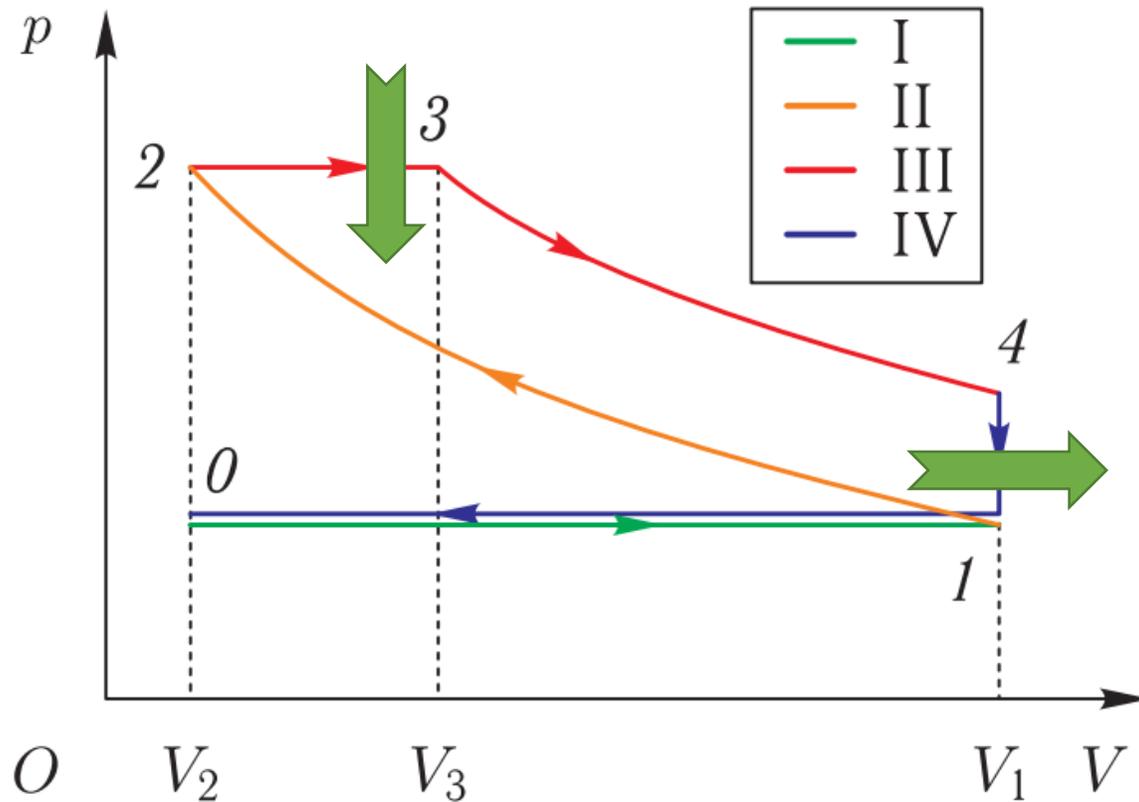


$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

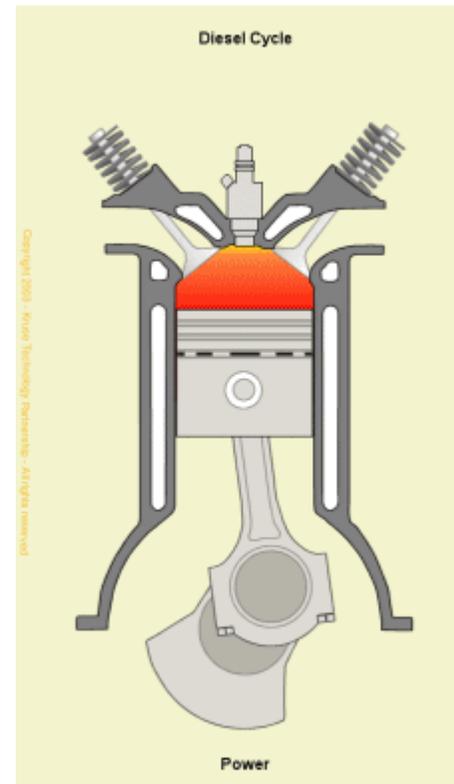
У современных двигателей $V_1/V_2 = 10$. Полагая $\gamma = 1.4$, получаем $\eta = 0,6$.

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

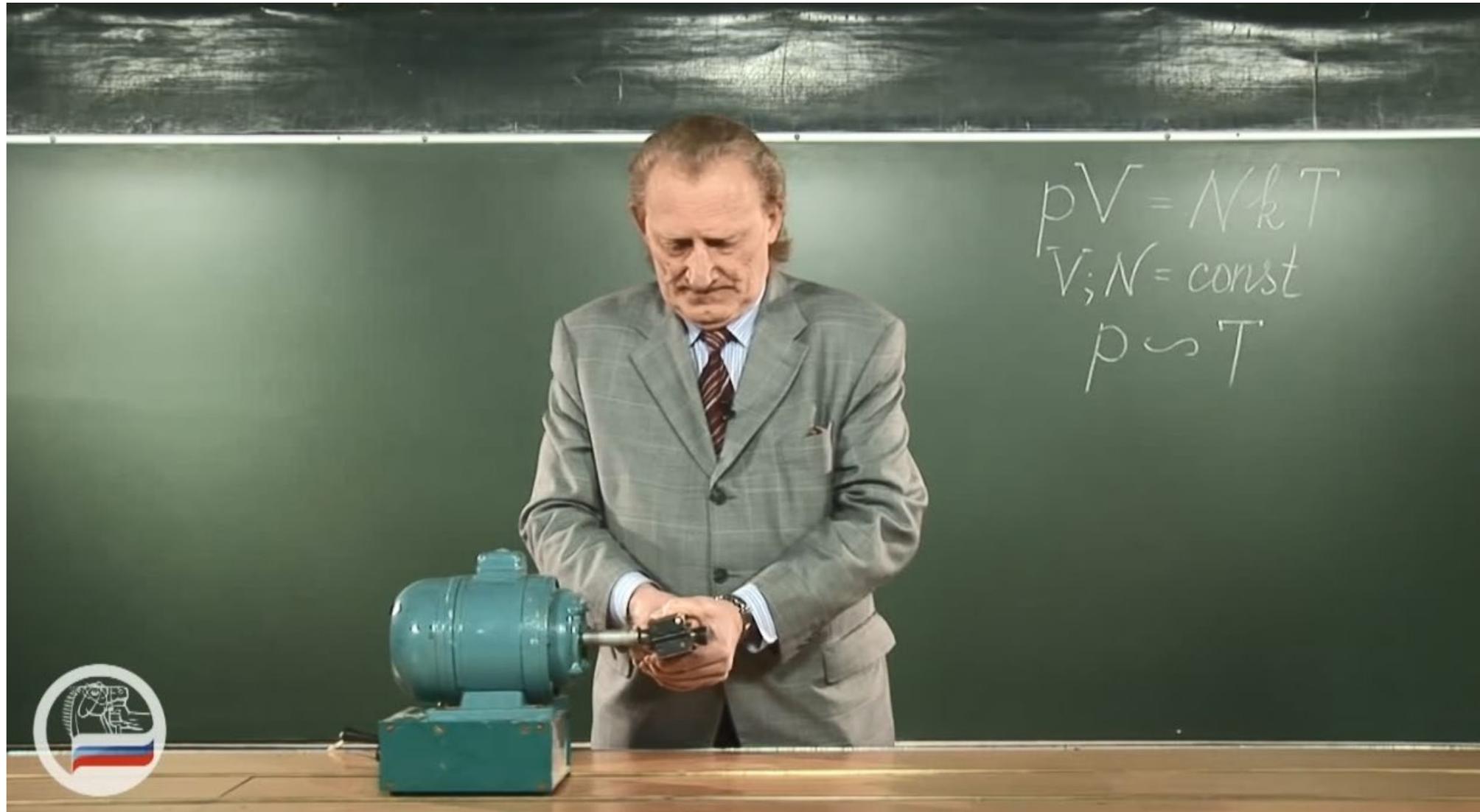


$$\eta = 1 + \frac{Q_-}{Q_+} = 1 + \frac{c_V(T_1 - T_4)}{c_P(T_3 - T_2)}$$



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



Адиабатическое охлаждение

