

# ЛЕКЦИЯ 7

## Термодинамика

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Устройство тепловой машины.
2. Коэффициент полезного действия тепловой машины.
3. Цикл Карно. Коэффициент полезного действия цикла.
4. Энтропия. Статистическое и термодинамическое определения.
5. Энтропия в изопроцессах.
6. Цикл Карно в координатах «температура-энтропия»

# ТЕРМОДИНАМИКА

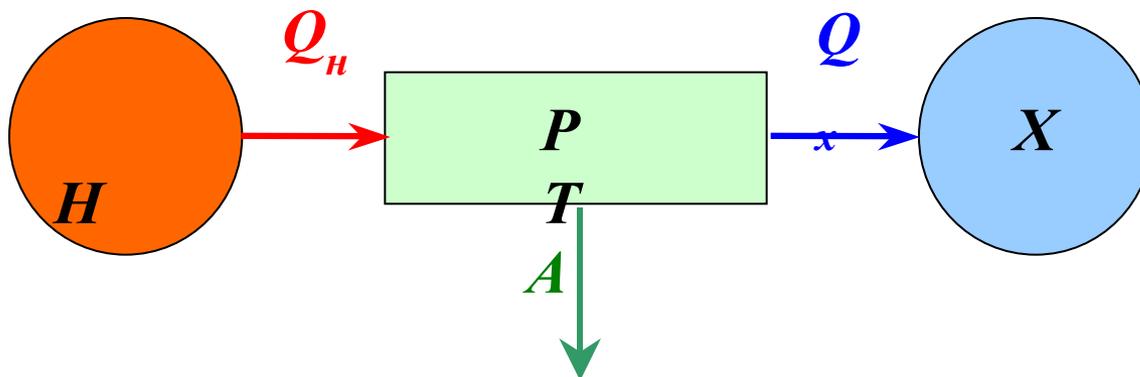
## Устройство тепловой машины

В основе тепловых машин лежат два принципа:

*Принцип первый. В машине должно присутствовать тепло, и оно должно превращаться в работу.*

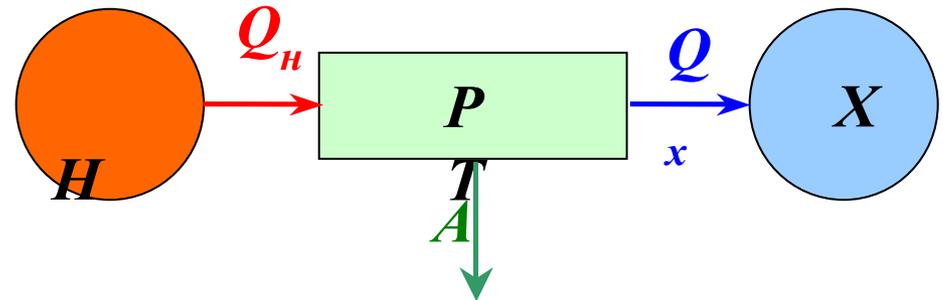
*Принцип второй. Тепловая машина должна работать циклически.*

Элементы тепловой машины: *нагреватель, рабочее тело, холодильник.*



# ТЕРМОДИНАМИКА

## Принцип работы тепловой машины



Рабочее тело, получая тепло от нагревателя, *меняет своё состояние*. Изменяется объём рабочего тела  $dV$ , совершается работа. Объём – это *функция состояния*.

В процессе работы тепловой машины возможна лишь одна устойчивая ситуация: состояние рабочего тела *меняется периодически*.

Тогда *графиком процесса*, происходящего с рабочим телом, является в любых координатах **замкнутая** линия, называемая **ЦИКЛОМ**.

**КАКИМ** должен быть цикл?

*Как, в какой последовательности* должны меняться в цикле функции состояния рабочего тела – давление, объём, температура и т.д.

# ТЕРМОДИНАМИКА

## Работа тепловой машины

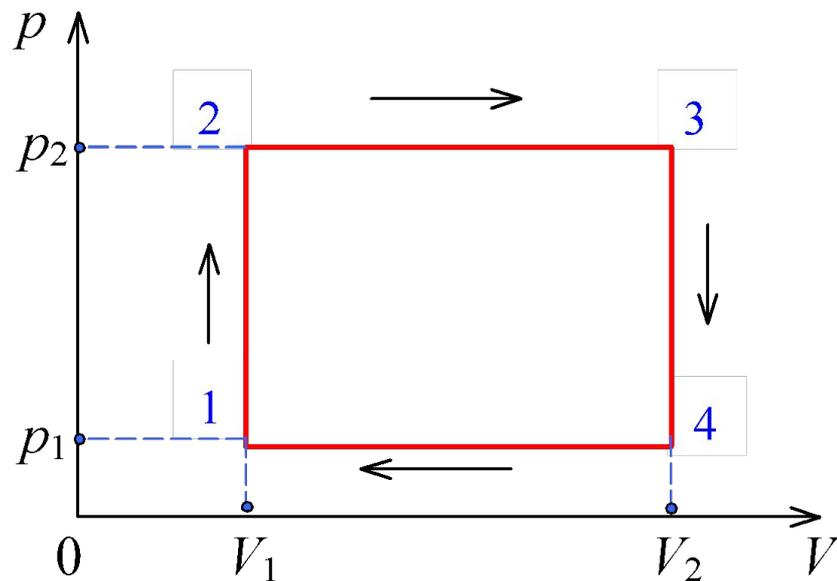
Решение: нарисовать на графике в каких-либо координатах произвольную замкнутую линию, а затем подобрать уравнения, которые её описывают. Например, нарисовать на графике в координатах  $(p, V)$  прямоугольник:

Уравнения этого цикла имеют вид:

$$(1 \rightarrow 2): V = V_1; \quad (2 \rightarrow 3): p = p_2; \quad (3 \rightarrow 4): V = V_2; \quad (4 \rightarrow 1): p = p_1.$$

*Хороший ли это цикл?*

*Количественной характеристикой цикла и, значит, тепловой машины, является коэффициент полезного действия (к.п.д.).*



# ТЕРМОДИНАМИКА

## Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.

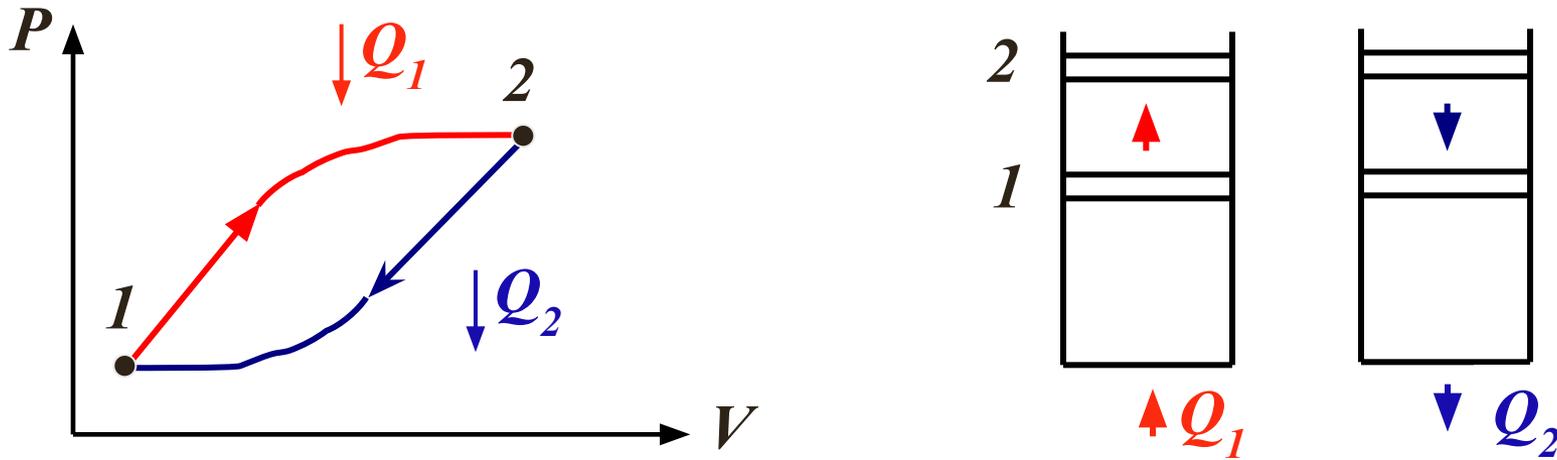
**Коэффициентом полезного действия** тепловой машины (цикла) называется отношение *работы*  $A$ , совершаемой машиной за цикл, к *теплу*  $Q_H$ , которое за цикл передаёт нагреватель рабочему телу.

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H} = 1 - \frac{Q_x}{Q_H}$$

Покажем это на примере простого цикла

# ТЕРМОДИНАМИКА

## Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.



Приведем цилиндр в контакт с тепловым резервуаром – рабочее тело начнет разогреваться и расширяться.

Цилиндр, получив тепло  $Q_1$  и совершив работу  $A_1$ , перейдет в состояние 2. В соответствии с первым началом термодинамики:

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$$

Для возврата поршня в исходное состояние 1, необходимо сжать рабочее тело, т.е. затратить работу  $-A_2$ .

Выигрыш в работе, если  $A_2 < A_1$ . Следовательно, сжатие следует производить при охлаждении цилиндра:

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2$$

# ТЕРМОДИНАМИКА

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2$$

В круговом цикле тепловая машина получила от нагревателя тепло  $Q_1$  и отдала холодильнику тепло  $-Q_2$ . Количество тепла  $Q_1 - Q_2$  пошло на совершение полезной работы .

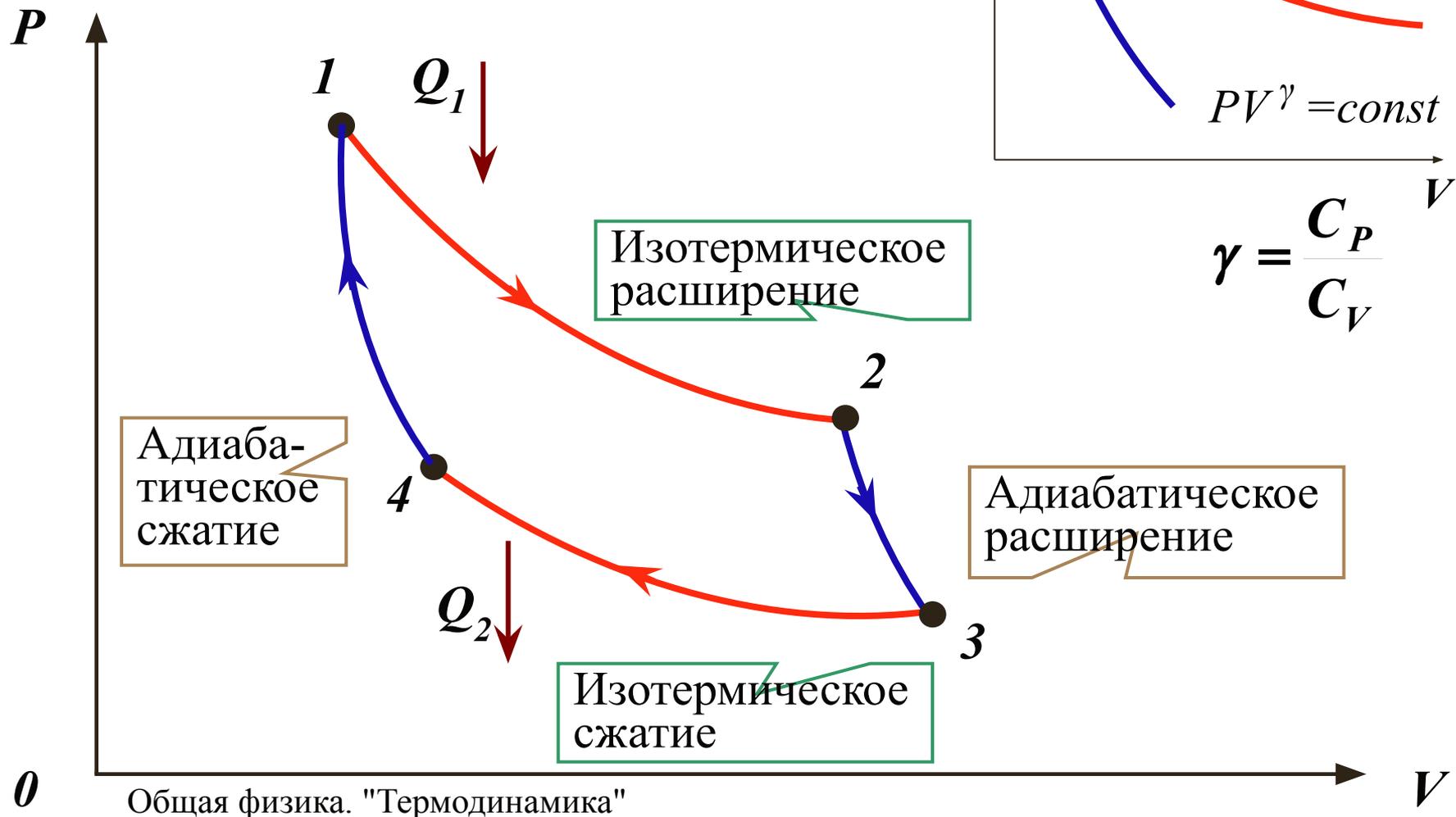
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

*Это коэффициент полезного действия (кпд) тепловой машины*

Периодически действующая тепловая машина без холодильника, т.е. при  $Q_2 = 0$ , имела бы кпд 100%, т.е. вся заимствованная теплота превращается в работу. Закон сохранения энергии не нарушается. Вечный двигатель – перпетуум мобиле второго рода.

# ТЕРМОДИНАМИКА

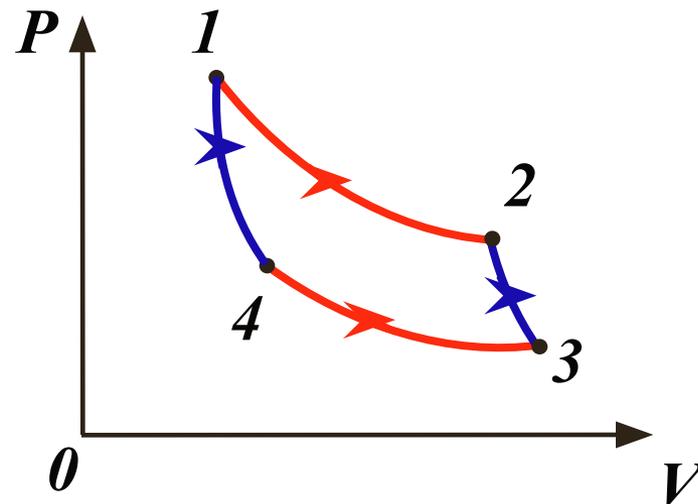
## Тепловая машина Карно. Цикл Карно



# ТЕРМОДИНАМИКА

## Цикл Карно

**Такт расширения (1-2-3).** Рабочее тело совершает *положительную* работу. В точке 2 прекращается контакт с нагревателем. На участке (2-3) совершается *положительная* работа, убывает внутренняя энергия и понижается температура рабочего тела.

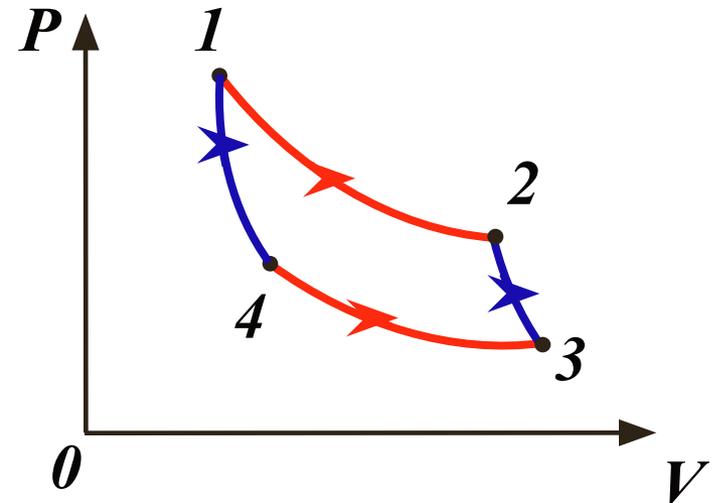


**Такт сжатия (3-4-1).** Рабочее тело сжимают, чтобы вернуть его в состояние 1. В точке 3 - контакт с холодильником и изотермическое сжатие действием внешних сил. Совершается *отрицательная* работа сжатия, холодильнику передается часть теплоты. В точке 4 прекращается контакт с холодильником. Рабочее тело адиабатически сжимается внешними силами до точки 1.

# ТЕРМОДИНАМИКА

**Особенность цикла Карно.** Работа  $A_{23}$ , которую рабочее тело совершает при *адиабатическом расширении*, равна работе  $A_{14}$ , которая совершается *внешней силой* при *адиабатическом сжатии* рабочего тела. Адиабатическое расширение рабочего тела не вносит вклад в полезную работу машины.

## Цикл Карно



**Уникальность цикла Карно.** При одном нагревателе и одном холодильнике обратимым может быть только цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, т.е. цикл Карно. Обратимый теплообмен рабочего тела с нагревателем и холодильником происходит на изотермах. Переходы между изотермами при отсутствии тел с промежуточными между  $T_1$  и  $T_2$  температурами могут быть только адиабатическими, без теплообмена.

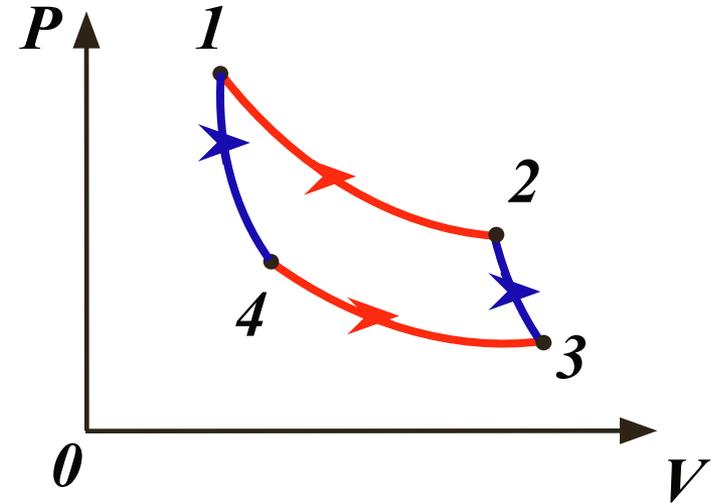
# ТЕРМОДИНАМИКА

## Цикл Карно. КПД

Пусть рабочее тело - идеальный газ. Полезная работа цикла равна алгебраической сумме работ на всех его ветвях. Тогда КПД равен:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}}{Q_1}$$

$Q_1$  - теплота, которую рабочее тело получает от нагревателя



Работа на изотермических участках:

$$A_{12} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

$$A_{34} = -\nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

Работа на адиабатических участках:

$$A_{23} = \nu c_v (T_1 - T_2),$$

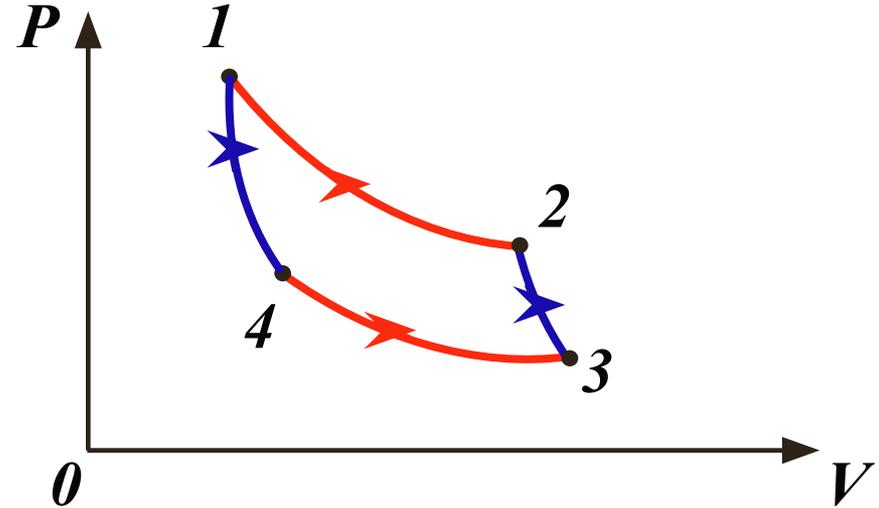
$$A_{41} = -\nu c_v (T_1 - T_2)$$

# ТЕРМОДИНАМИКА

## Цикл Карно. КПД

Для идеального газа работа при изотермическом процессе равна поглощенной теплоте:

$$Q_1 = A_{12} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$



Подставляя все выражения в формулу для КПД, получим

$$\eta = \frac{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

Исключим из этого выражения объемы. Запишем уравнения состояний

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma$$

$$P_3 V_3 = P_4 V_4$$

$$P_4 V_4^\gamma = P_1 V_1^\gamma$$

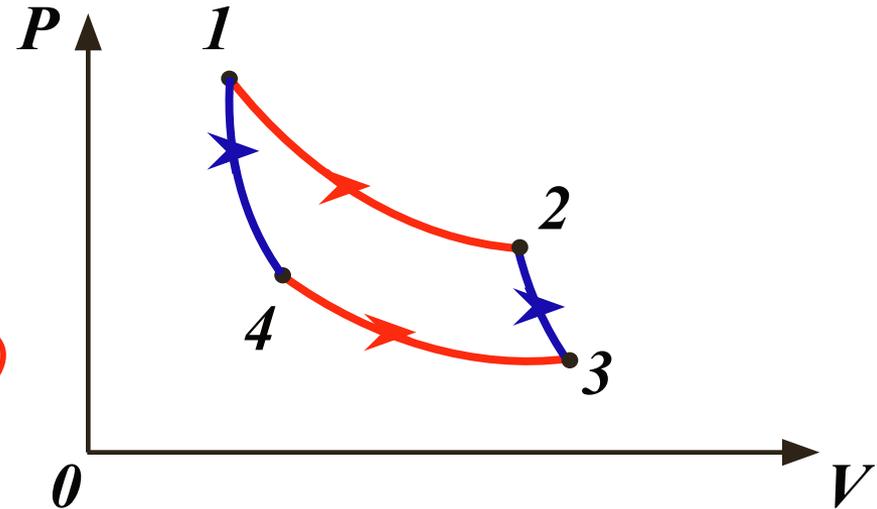
# ТЕРМОДИНАМИКА

## Цикл Карно. КПД

Из этих соотношений можно получить

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

Получить  
самостоятельно!



Выражение для КПД принимает окончательный вид:

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

Полученное значение КПД есть предельное значение для тепловых машин, В реальных условиях к нему можно приближаться, но невозможно его достигнуть.

Получить  
самостоятельно!

# ТЕРМОДИНАМИКА

## Энтропия. Статистический подход

Количество возможных микросостояний системы, находящейся в некотором макросостоянии, называется **статистическим весом макросостояния**.

Статистический вес  $\Omega$  - функция макросостояния. Использовать  $\Omega$  как функцию макросостояния неудобно - большие числа. Пример: для одного моля кислорода при атмосферном давлении и комнатной температуре  $\Omega = 10^{6,5 * 10^{24}}$

В термодинамике в качестве энтропии применяется величина

$$S = k * \ln \Omega$$

$k$  – постоянная Больцмана

Пример. Для моля кислорода при атмосферном давлении и комнатной температуре  $\Omega = 1.5 * 10^{10^{25}}$ , а  $S = 200$  Дж/К.

# ТЕРМОДИНАМИКА

## Энтропия. Термодинамический подход

С точки зрения термодинамики *энтропия* – это такая *функция состояния* системы, изменение которой  $dS$  в элементарном равновесном процессе равно отношению *порции тепла*  $\delta Q$ , которое система получает в этом процессе, к *температуре системы*  $T$ :

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Формулу для энтропии можно рассматривать как *определение* понятия “энтропия”. С её помощью можно вычислять *изменение* энтропии в ходе *любого равновесного процесса*. Для этого надо вычислить определённый интеграл:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{S_1}^{S_2} dS = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

# ТЕРМОДИНАМИКА

*Энтропия в изопроцессах*

*Цикл Карно в координатах «температура-энтропия»*

***Изучить самостоятельно!***

