

---

## ***Лекция 15 (2 сем).***

# ***Термодинамические процессы и цикл Карно***

1. Обратимые и необратимые термодинамические процессы.
2. Круговой процесс, его КПД.
3. 2-е начало термодинамики. Невозможность вечного двигателя.
4. Цикл Карно, 2 теоремы Карно.

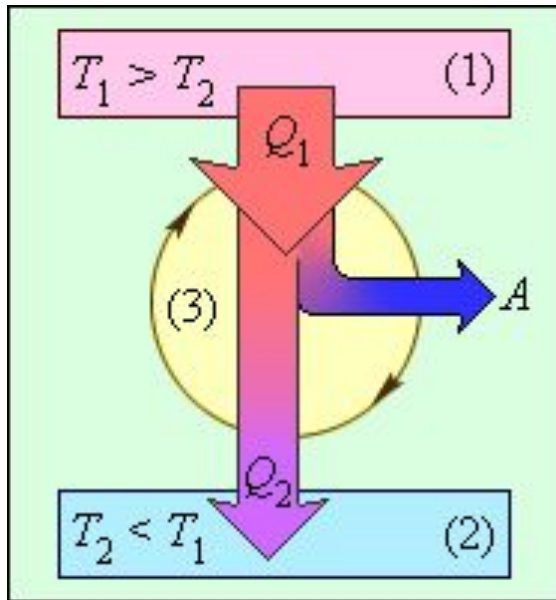
2017

# 1. Обратимые и необратимые термодинамические процессы. Квазистатические процессы

- Как показывает опыт, многие тепловые процессы могут протекать **только в одном направлении**. Такие процессы называются **необратимыми**.
  - Например, **при тепловом контакте** двух тел **с разными температурами** тепловой поток **всегда** направлен **от более теплого** тела к более холодному.
  - **Никогда не наблюдается самопроизвольный процесс** передачи тепла **от тела с низкой температурой** к телу с более высокой температурой.
  - Следовательно, **процесс теплообмена** при конечной разности температур является **необратимым**.
- **Другие примеры необратимых процессов:**
  - расширение газа в пустоту,
  - теплопередача.
- **Обратимый термодинамический процесс** – это такой термодинамический процесс, который он может быть проведен как **в прямом**, так и **в обратном** направлении **через одни и те же состояния**.
  - При этом сама система и окружающие тела **возвращаются** к исходному состоянию.
- Процессы, в ходе которых система **все время** остается **в состоянии равновесия**, называются **квазистатическими**.
- **Все квазистатические процессы обратимы**.
- Все **обратимые** процессы являются **квазистатическими**.

# Тепловой двигатель

- **Тепловой двигатель** - устройство, способное превращать полученное количество теплоты  $Q$  в механическую работу  $A$ .
  - Механическая работа в тепловых двигателях производится **в процессе расширения** некоторого вещества, которое называется **рабочим телом**.
  - В качестве рабочего тела обычно используются **газообразные вещества** (пары бензина, воздух, водяной пар).
  - **Рабочее тело** получает (или отдает) тепловую энергию **в процессе теплообмена** с телами, имеющими **большой запас внутренней энергии**. Эти тела называются **тепловыми резервуарами**.



Тепловой резервуар с более высокой температурой называют **нагревателем**, а с более низкой – **холодильником**.

Энергетическая схема тепловой машины:

1 – нагреватель;

2 – холодильник;

3 – рабочее тело, совершающее круговой процесс.

$$Q_1 > 0,$$

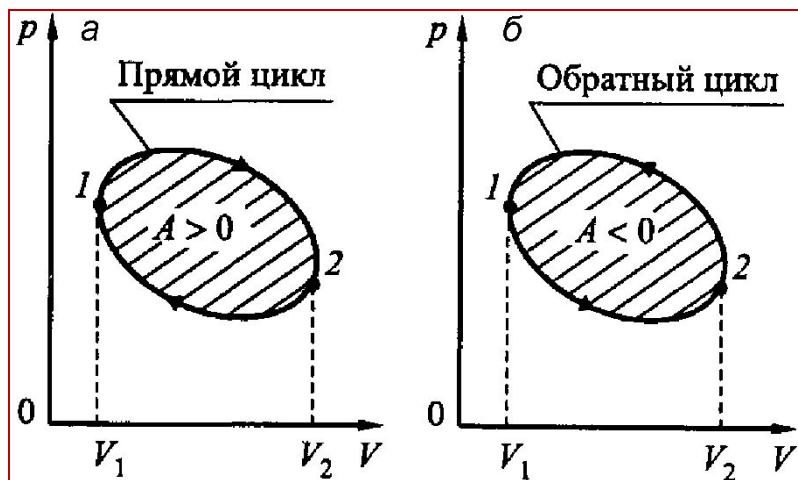
$$A > 0,$$

$$Q_2 < Q_1;$$

$$T_1 > T_2$$

## 2. Круговой процесс. Равновесные циклы

- **Реально существующие тепловые двигатели** (паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и т. д.) работают **циклически**.
- Процесс теплопередачи и преобразования полученного количества теплоты в работу **периодически повторяется**.
- Для этого рабочее тело должно совершать **круговой процесс** или **термодинамический цикл**, при котором **периодически восстанавливается исходное состояние**.
- **Цикл** или **круговой процесс** - это процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, **возвращается в исходное**.
- На диаграмме  **$pV$  равновесный цикл** изображается **замкнутой кривой**.



$$A = \oint p dV$$

Работа за цикл

- Если за цикл совершается **положительная** работа  **$A > 0$** , а сам цикл осуществляется **по ходу часовой стрелки**, то он называется **прямым циклом**.
- Если за цикл выполняется **отрицательная** работа  **$A < 0$** , а сам цикл протекает **против хода часовой стрелки**, то он называется **обратным циклом**.

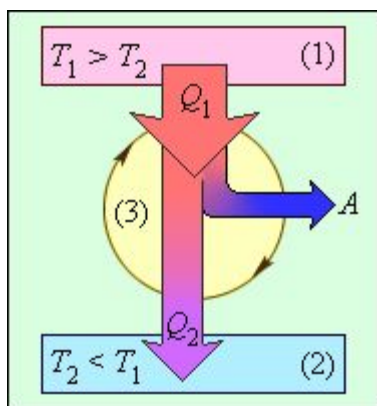
### 3. Второе начало термодинамики. Понятие прямого и обратного цикла

- **Второе начало термодинамики** указывает **на направленность самопроизвольного** термодинамического процесса в замкнутой системе.  
**Две формулировки:**
  - 1. **Невозможен процесс, единственным результатом** которого является **передача энергии в форме теплоты от менее нагретого** тела к более нагретому (формулировка **Клаузиуса**).
  - 2. **Невозможен процесс, единственным результатом** которого является **превращение всей теплоты**, полученной от нагревателя, **в эквивалентную работу** (формулировка **Кельвина**).
- **Прямой цикл** реализуется **в тепловом двигателе** — периодически действующем устройстве, которое **совершает работу** за счет полученной **от нагревателя** теплоты  **$Q$** .
- **Обратный цикл** используется **в холодильных установках** - периодически действующих устройствах, в которых **за счет работы  $A$  внешних сил** теплота переносится **от более холодного тела** к телу с более высокой температурой.

**Общее свойство всех круговых процессов** состоит в том, что их невозможно провести, приводя рабочее тело в тепловой контакт **только с одним** тепловым резервуаром.

Их нужно, по крайней мере, два: **нагреватель и холодильник**.

# Тепловые и холодильные машины



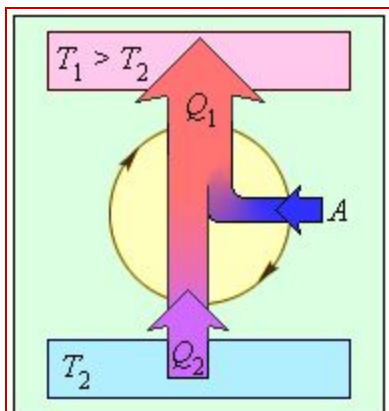
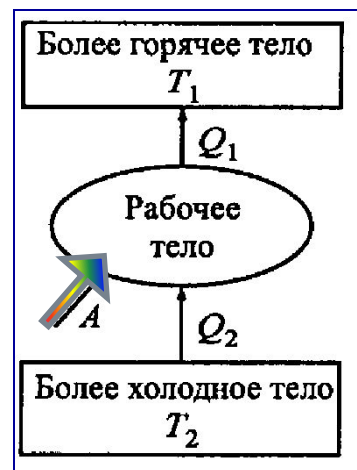
- В **тепловом двигателе** от нагревателя с температурой  $T_1$  за цикл **отнимается** количество теплоты  $Q_1$ , а холодильнику с более низкой температурой за цикл передается количество теплоты  $Q_2$ .
- При этом совершается работа  $A > 0$ .

На основании **первого начала термодинамики** эта работа равна:

$$A = Q_1 - Q_2$$

Термический **коэффициент полезного действия** (КПД):

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



Энергетическая схема холодильной машины

- В **холодильной установке** за счет совершения внешними силами работы  $A$  от **более холодного тела** с температурой  $T_2$  за цикл **отнимается** количество теплоты  $Q_2$  и отдается во внешнюю среду с температурой  $T_1 > T_2$  количество теплоты, равное  $Q_1$ .
- Для оценки **эффективности работы** холодильной установки используют отношение количества теплоты, отнятого за цикл от холодильной камеры  $Q_2$ , к работе  $A$  внешних сил.

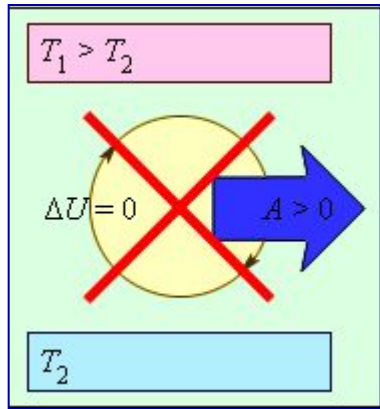
$$k = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

- Эта величина называется **холодильным коэффициентом  $k$** :

# Невозможность вечного двигателя

Все проекты вечных двигателей можно разделить на два типа:

**1 тип:** Циклически работающие тепловые машины, **запрещаемые первым началом** термодинамики:

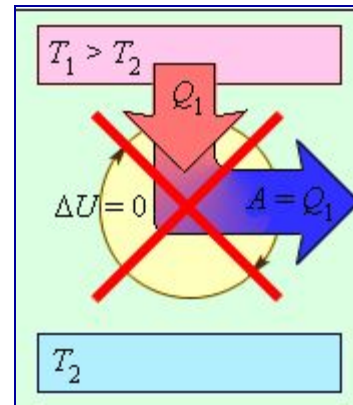


$$A = Q_1 - Q_2$$

1. Тепловая машина, совершающая работу **без потребления энергии извне.**

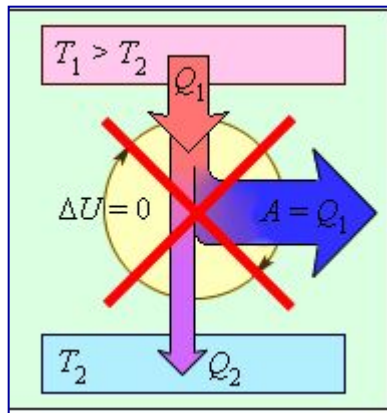
**1. Вечный двигатель 1 рода**

**2 тип:** Циклически работающие тепловые машины, **не противоречащие** первому началу термодинамики, но **запрещаемые** вторым началом термодинамики:



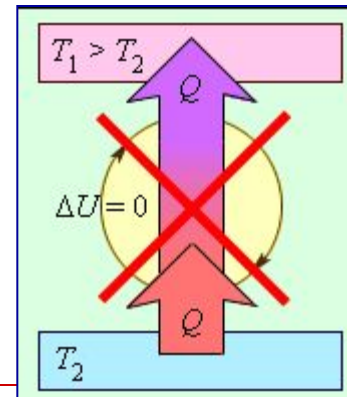
Тепловая машина, переводящий **ВСЮ** внешнюю энергию в работу.

**3. Вечный двигатель 2 рода**



Тепловая машина с **коэффициентом полезного действия  $\eta > 1$ .**

**2. Сверхэффективная тепловая машина**

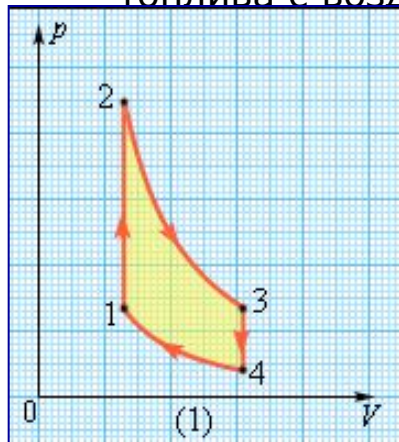


Холодильная машина с **самопроизвольным** переходом тепла **от холодного тела** к более теплому.

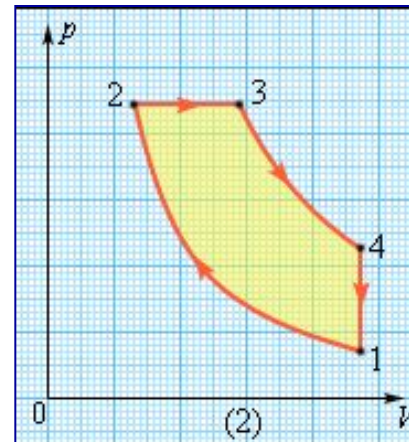
**4. Идеальная холодильная машина**

## 4. Примеры циклов. Цикл Карно и теоремы Карно

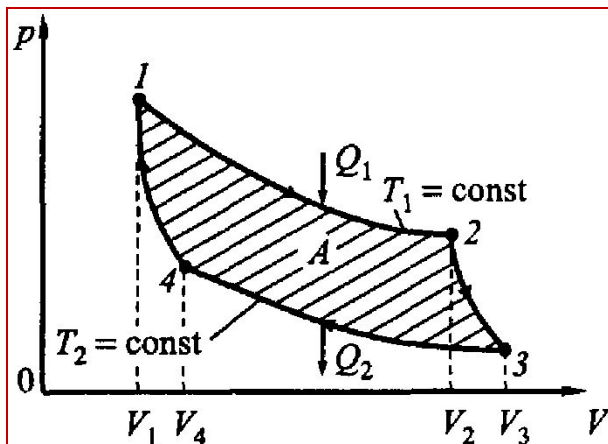
- В двигателях, применяемых в технике, используются различные **круговые процессы**.
- На рисунках изображены циклы, используемые в бензиновом карбюраторном и в дизельном двигателях.
- В обоих случаях **рабочим телом** является **смесь паров** бензина или дизельного топлива с воздухом.



Цикл **карбюраторного двигателя** внутреннего сгорания состоит из: **двух изохор** (1-2, 3-4) и **двух адиабат** (2-3, 4-1). Реальный коэффициент полезного действия у карбюраторного двигателя порядка **30 %**.



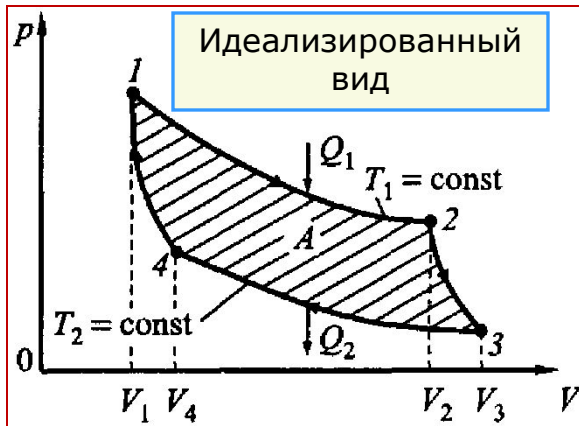
Цикл **дизельного двигателя** внутреннего сгорания состоит из: **двух адиабат** (1-2, 3-4), **одной изобары** (2-3) и **одной изохоры** (4-1). Реальный коэффициент полезного действия у дизельного двигателя – порядка **40 %**.



- **Цикл Карно** – это цикл, состоящий из **двух адиабат** и **двух изотерм**.
- В **обратимом цикле** Карно тепло, отнятое от тела, превращается в **максимально возможную механическую работу**.
- В данном цикле **должны отсутствовать необратимые процессы теплопроводности**.

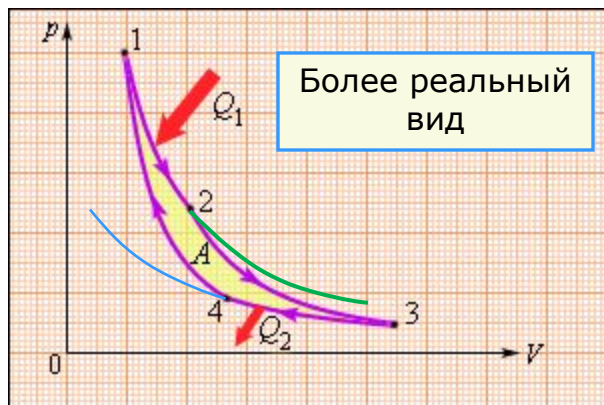


# Цикл Карно и теоремы Карно



На графике изображен **прямой цикл Карно**, состоящий из четырех последовательных процессов:

- 1-2 — **изотермическое расширение** при температуре  $T_1$ ;
- 2-3 — **адиабатическое расширение** ( $\delta Q_{23} = 0$ );
- 3-4 — **изотермическое сжатие** при температуре  $T_2$ ;
- 4-1 — **адиабатическое сжатие** ( $\delta Q_{41} = 0$ ).



- На всех стадиях рассмотренного кругового процесса нигде не допускается соприкосновение двух тел с различными температурами, и, таким образом, **исключается** необратимый процесс теплопроводности.
- Весь цикл проводится, следовательно, обратимым путем.
- Данный цикл протекает независимо от вида рабочего тела.

**Найдем КПД цикла**, в котором рабочим телом является **идеальный газ**.

- При **изотермическом расширении** на участке 1-2 количество теплоты  $Q_1$  полученное газом от нагревателя, равно работе расширения, совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2:

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

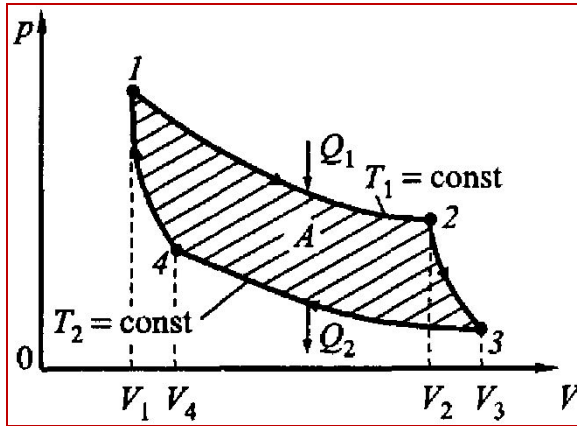
Теплота, отданная газом холодильнику (участок 3-4):

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

**Термический КПД цикла Карно** по определению:

$$\eta = \frac{Q_{12} - Q_{34}}{Q_{12}} = \frac{T_1 \ln(V_2/V_1) - T_2 \ln(V_3/V_4)}{T_1 \ln(V_2/V_1)}$$

## Цикл Карно и 1-я теорема Карно



На графике изображен **прямой цикл Карно**, состоящий из четырех последовательных процессов:

1-2 — **изотермическое расширение** при температуре  $T_1$ ;

2-3 — **адиабатическое расширение** ( $\delta Q_{23} = 0$ );

3-4 — **изотермическое сжатие** при температуре  $T_2$ ;

4-1 — **адиабатическое сжатие** ( $\delta Q_{41} = 0$ ).

Применим уравнение адиабаты:

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

для участка **2-3**

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

для участка **4-1**

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

Разделим одно  
выражение на  
второе

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

Тогда КПД цикла равен:

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

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

- **Вывод:** для цикла Карно КПД **определяется только** температурами нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ .
- Полученный результат имеет **общий характер** и представляет собой содержание **первой теоремы Карно**.

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

## 2-я теорема Карно

- **КПД обратимого цикла** Карно **не зависит** от природы рабочего тела и от технических способов осуществления цикла.
- **Сравнение КПД** различных обратимых и необратимых циклов с КПД обратимого цикла Карно (идеальной тепловой машины) позволило сделать следующий вывод (**вторая теорема Карно**):
  - КПД **любого реального** обратимого или необратимого **прямого кругового процесса** (тепловой машины)  $\eta_{\text{любого}}$  **не может превышать** КПД обратимого цикла Карно  $\eta_{\text{Карно}}$  при одинаковых температурах  $T_1$  нагревателя и  $T_2$  холодильника:

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \geq \eta_{\text{любого}}$$

Тогда:  $\frac{T_1 - T_2}{T_1} \geq \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \rightarrow 1 - \frac{T_2}{T_1} \geq 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \rightarrow \frac{Q_1}{T_1} \geq \frac{Q_2}{T_2}$

- **Обратный цикл Карно** служит основой работы идеальной холодильной установки. Для **холодильного коэффициента  $k$** :

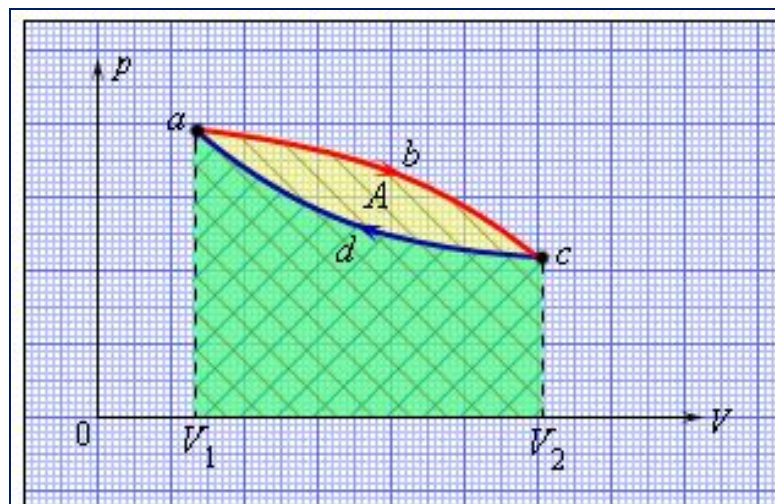
$$k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \leq \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

- **Вывод: чем меньше** разность между температурами окружающей среды  $T_1$  и холодильной камеры  $T_2$ , **тем больше** холодильный коэффициент  $k$  и **тем эффективнее** работа холодильной установки.

# Спасибо за внимание!

- Графическое представление 1-го начала термодинамики:

$$A = Q_1 - Q_2$$



Круговой процесс на диаграмме  
( $p, V$ ).

$abc$  – кривая расширения,

$cda$  – кривая сжатия.

Работа  $A$  в круговом процессе равна площади  
фигуры  $abcd$