

ВоГУ

Лекция 5

**Молекулярно-кинетическая
теория (МКТ) и
термодинамика**

*Кузина Л.А.,
к.ф.-м.н.,
доцент*

2020 г.

План

1. Предмет молекулярной физики. Статистический и термодинамический методы исследований.
2. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Уравнение состояния.
3. Законы: Авогадро, Дальтона, Паскаля.
4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ).
5. Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы.
6. Предмет и задачи термодинамики.
7. Нулевое начало. Температура.
8. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Теплоёмкость.
9. Работа идеального газа в изопроцессах.
10. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам
11. Круговой процесс (цикл). КПД цикла
12. Второе начало термодинамики
13. Обратимые и необратимые процессы
14. Цикл Карно

Молекулярная физика изучает строение и свойства вещества

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) исходит из молекулярно-кинетических представлений:

- 1) все вещества состоят из молекул (атомов);
- 2) молекулы (атомы) находятся в непрерывном движении;
- 3) молекулы взаимодействуют между собой.

Экспериментальные доказательства молекулярно-кинетических представлений:

- 1) Броуновское движение
- 2) диффузия

Методы исследований:

1) статистический

метод основан на том, что свойства макросистем, состоящих из большого числа микрочастиц, определяются усреднёнными значениями характеристик этих микрочастиц (например, скоростей, энергий)

2) термодинамический

Термодинамика изучает общие свойства макросистем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между состояниями.

В основе термодинамики лежат **3 закона** (начала) термодинамики, основанных на опыте.

Основные понятия (определения)

Система – это любая мысленно выделенная совокупность тел

Окружающая среда – это всё, что не входит в систему

Параметры (термодинамические переменные) – переменные, определяющие состояние системы в термодинамике – температура, давление, объём

Экстенсивные

зависят от количества вещества (V, m, μ)

Интенсивные

не зависят от количества вещества (T, p)

Уравнение состояния – уравнение вида: $f(p, V, T) = 0$, связывающее параметры системы

Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Уравнение состояния

Газ идеальный,
если

- 1) Собственным объёмом молекул можно пренебречь по сравнению с объёмом сосуда.
- 2) Взаимодействием молекул между собой можно пренебречь.
- 3) Столкновения молекул между собой и со стенками сосуда – абсолютно упругие.

При нормальных условиях ($T=273\text{ К}$, $p=10^5\text{ Па}$) газ можно считать идеальным

Законы идеального газа, найденные опытным

1) Закон Бойля-Мариотта

($T=const$) изотермический

процесс

$$pV = const$$

2) Закон Гей-Люссака

($p=const$)

изобарический процесс

$$\frac{V}{T} = const$$

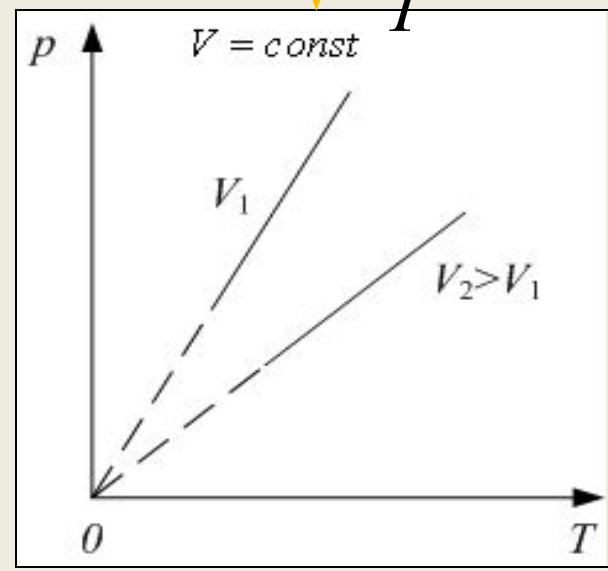
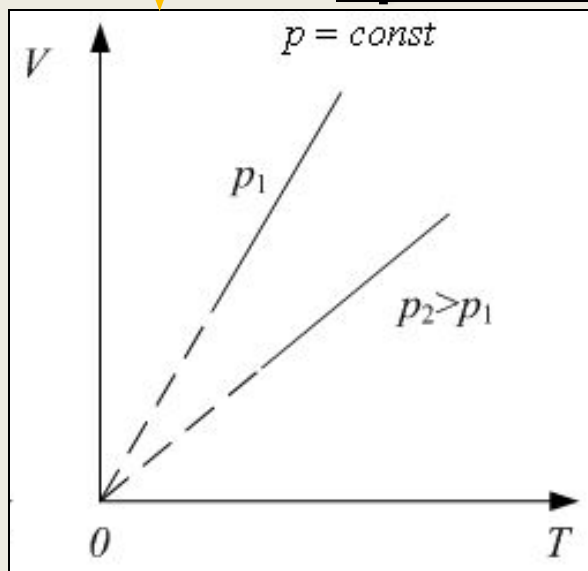
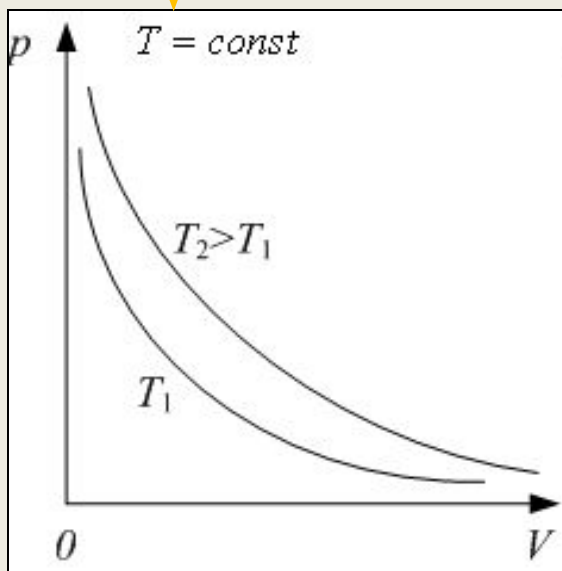
3) Закон Шарля

($V=const$)

изохорический

процесс

$$\frac{p}{T} = const$$



Уравнение состояния идеального газа

Объединённый газовый закон обобщает все три закона:

$$\begin{array}{ccc} pV = const & \frac{V}{T} = const & \frac{p}{T} = const \\ & \downarrow & \swarrow \\ & \frac{p \cdot V}{T} = const & \\ & \Downarrow & \\ & p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot RT & \end{array}$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона – уравнение состояния идеального газа

Уравнение состояния идеального газа

Закон Авогадро: В одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул (атомов), равное

числу Авогадро N_A

$$p = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{RT}{V} = \frac{m_0 \cdot N_A \cdot N}{m_0 \cdot N_A \cdot V} \cdot \frac{RT}{V} = \frac{N}{V} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T = n \cdot k \cdot T$$

$$m = m_0 \cdot N$$

масса

$$\mu = m_0 \cdot N_A$$

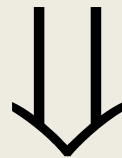
молярная масса

$$k = \frac{R}{N_A}$$

постоянная
Больцмана

$$n = \frac{N}{V}$$

концентрация



$$p = n \cdot k \cdot T$$

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot RT$$

Давление смеси газов

Парциальное давление – это давление, которое оказывал бы данный газ в отсутствие других газов при тех же условиях

Закон Дальтона: давление смеси газов равно сумме парциальных давлений всех входящих в смесь газов:

$$p = \sum_i p_i$$

Доказательство:

$$p = n \cdot k \cdot T = \left(\sum_i n_i \right) \cdot kT = \sum_i (n_i \cdot kT) = \sum_i (p_i)$$

Закон Паскаля: давление в любой точке покоящегося газа одинаково по всем направлениям и одинаково передаётся по всему объёму

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

(МКТ)

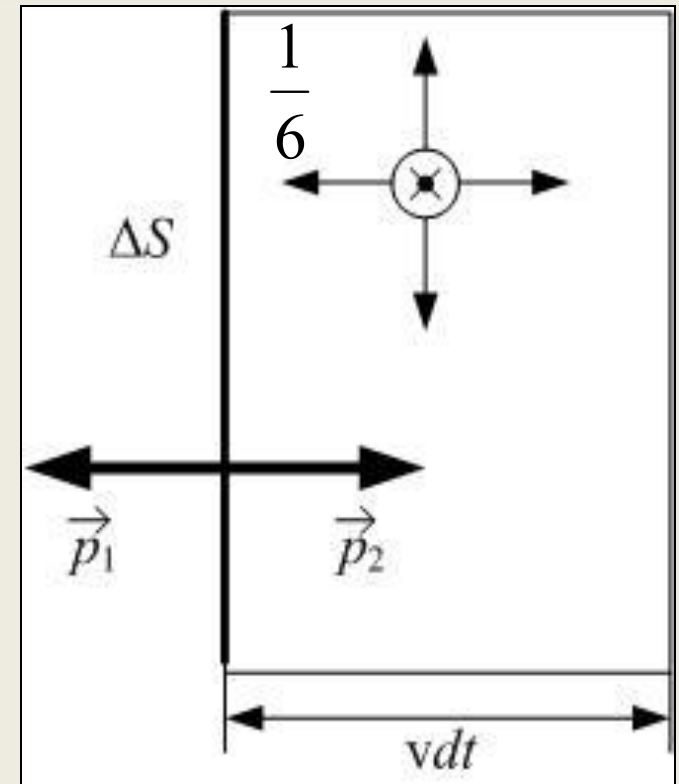
Давление газа на стенку – результат передачи стенке импульса молекулами при упругих соударениях со

стенкой

Предположения

:

- 1) все молекулы имеют одинаковые скорости v
- 2) молекулы могут двигаться только в трёх взаимно перпендикулярных направлениях – либо параллельно стенке, либо перпендикулярно ей



Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

(МКТ)

Молекула при упругом столкновении передаёт стенке импульс $2m_0 \cdot v$

За время dt до стенки площадью dS долетит число молекул:

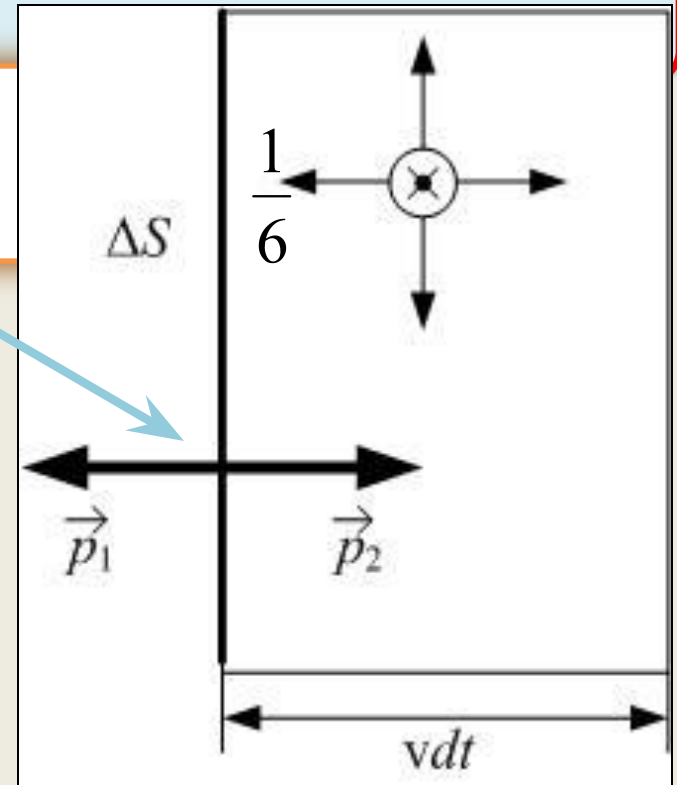
$$N = \frac{1}{6} n \cdot dV = \frac{1}{6} n \cdot \Delta S \cdot v \cdot dt$$

Стенка получает импульс:

$$dp_{\text{импульс}} = N \cdot 2m_0 \cdot v = \frac{1}{6} n \cdot \Delta S \cdot v \cdot dt \cdot 2m_0 \cdot v = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \Delta S \cdot v^2 \cdot dt$$

$$dp_{\text{импульс}} = F \cdot dt$$

$$F = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \Delta S \cdot v^2 \quad \rightarrow \quad p = \frac{F}{\Delta S} = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot v^2$$



Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ)

$$p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot v^2 \quad \rightarrow \quad p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot v_{\text{КВ.}}^2$$

Средняя квадратичная скорость
По определению:

$$v_{\text{КВ.}} = \sqrt{\frac{\sum_i^N v_i^2}{N}}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{N \cdot m_0}{V} = n \cdot m_0$$

$$v_{\text{КВ.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

$$p = \frac{1}{3} \rho \cdot v_{\text{КВ.}}^2$$

$$\begin{cases} p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot v_{\text{КВ.}}^2 \\ p = n \cdot k \cdot T \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot v_{\text{КВ.}}^2 = n \cdot k \cdot T \Rightarrow \frac{1}{3} m_0 \cdot v_{\text{КВ.}}^2 = k \cdot T$$

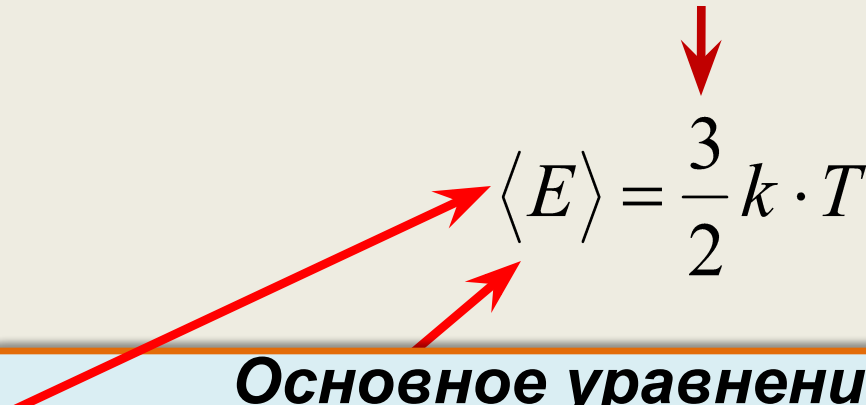
$$\langle E \rangle = \frac{m_0 \cdot v_{\text{КВ.}}^2}{2} \quad \rightarrow \quad p = \frac{2}{3} n \cdot \langle E \rangle$$

Средняя энергия поступательного движения молекул

Основное уравнение МКТ для давления

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ)

$$\begin{cases} p = \frac{2}{3} n \cdot \langle E \rangle \\ p = n \cdot k \cdot T \end{cases} \Rightarrow \frac{2}{3} n \cdot \langle E \rangle = n \cdot k \cdot T \Rightarrow \frac{2}{3} \langle E \rangle = k \cdot T$$


$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} k \cdot T$$

Основное уравнение МКТ для температуры

Отсюда / смысл абсолютной температуры: при абсолютном нуле ($T=0$ К) прекращается тепловое движение молекул, \rightarrow абсолютный нуль недостижим.

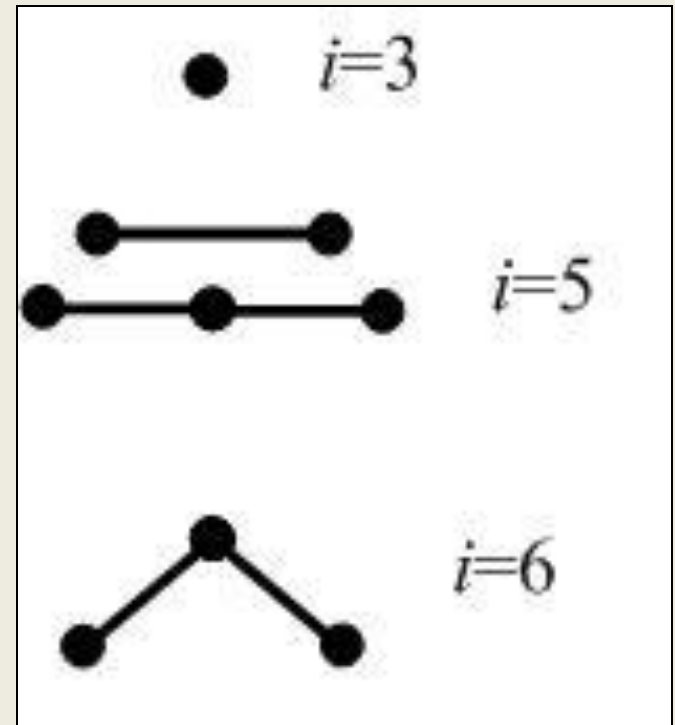
Этим соотношением можно ввести понятие (определение) **абсолютной температуры T**

Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы

На любую степень свободы приходится в среднем одинаковая энергия, равная

$$\langle E_1 \rangle = \frac{k \cdot T}{2}$$

Число степеней свободы i равно числу независимых координат, однозначно определяющих положение тела (или молекулы) в пространстве

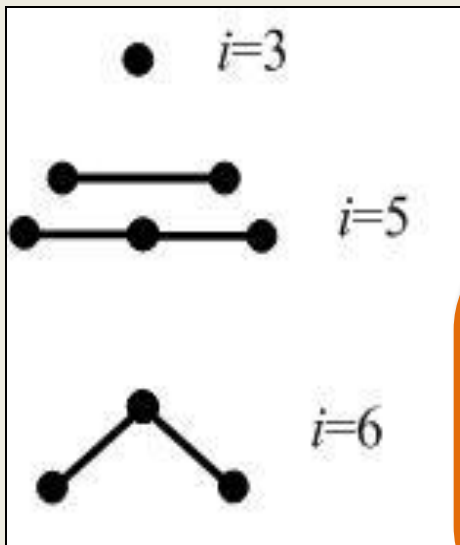


Число степеней свободы

Одноатомные:

$$i = i_{\text{пост}} = 3$$

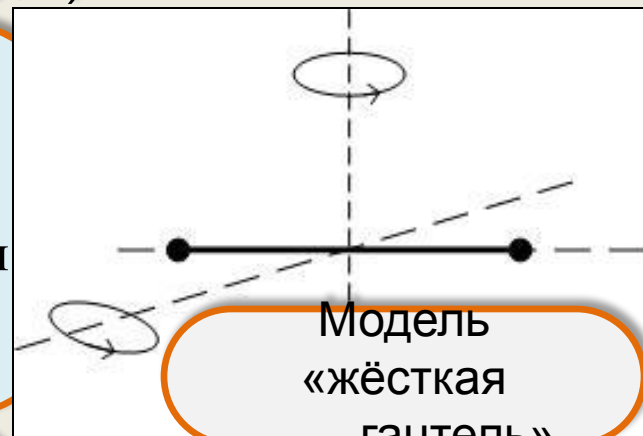
(3 координаты - X, Y, Z)



Двухатомные:

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр.}} = 3 + 2 = 5$$

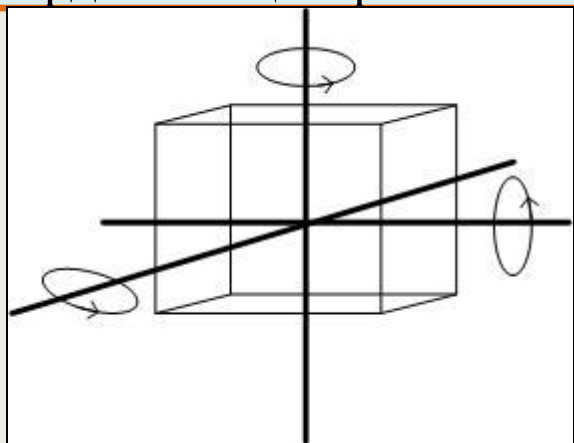
(3 координаты центра масс и 2 угловых; одна из осей неактивна)



Многоатомные нелинейные и абсолютно твёрдое тело:

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр.}} = 3 + 3 = 6$$

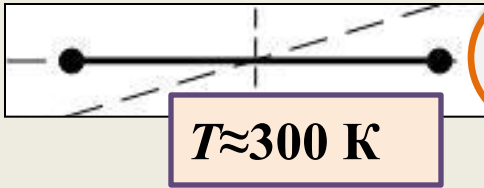
(3 координаты центра масс и 3 угловых)



$$i_{\text{эфф.}} = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр.}} + 2i_{\text{кол}} = 3 + 2 + 2 \cdot 1 = 7$$

2 вида энергии при колебаниях: кинетическая и потенциальная

Ограничения теоремы о равнораспределении



Модель
«жёсткая
гантель»

*Не работает при
высоких и при низких
температурах*

При высоких температурах
надо учитывать
колебательные степени свободы:

Модель
«нежёсткая
гантель»:



$$i_{\text{эфф.}} = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр.}} + 2i_{\text{кол}} = 3 + 2 + 2 \cdot 1 = 7$$

2 вида энергии при колебаниях:
кинетическая и потенциальная

При низких температурах «замораживаются» вращательные
степени свободы, и нужно учитывать только пост $i = i_{\text{пост}} = 3$:

Внутренняя энергия идеального газа

На одну степень
свободы:

$$\langle E_1 \rangle = \frac{k \cdot T}{2}$$

Средняя энергия молекулы с i степенями
свободы:

$$\langle E_{\text{мол.}} \rangle = \frac{i}{2} k \cdot T$$

Суммарная энергия N молекул идеального
газа:

$$U = N \cdot \langle E_1 \rangle = \frac{N \cdot i \cdot k \cdot T}{2} = \frac{\nu \cdot N_A \cdot k \cdot i \cdot T}{2} = \frac{\nu \cdot i \cdot (N_A \cdot k) \cdot T}{2} = \nu \cdot \frac{i}{2} \cdot RT$$

Внутренняя энергия идеального газа – суммарная кинетическая энергия всех молекул; потенциальная энергия взаимодействия молекул не учитывается

Внутренняя энергия U – суммарная кинетическая и потенциальная

энергия всех частиц: электронов в атомах, нуклонов в ядрах атомов и т.д. Внутренняя энергия **не включает** энергию движения тела как целого (движения центра масс и вращения тела как целого) и потенциальную энергию тела во внешних полях

Термодинамика

Термодинамика изучает общие свойства макросистем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между состояниями. Термодинамика позволяет понять, какие процессы возможны, а какие – нет.

Отвлекаясь от движения тела как целого, термодинамика сосредотачивает внимание на изменениях внутреннего состояния тела, состояния термодинамической системы

На основе общих принципов механики пытались установить связь между молекулярным движением и тепловыми явлениями

Термодинамику пытались свести к механике

Это принципиально невозможно

Законы Ньютона обратимы во времени

Тепловые процессы необратимы: теплота переходит от горячего к холодному, но не наоборот

**Ньютоновская механика принципиально не может
объяснить необратимость процессов**

Сведение термодинамики к механике оказывается невозможным

Предмет и задачи термодинамики

Пример: греем газ в закрытом сосуде, приведя его в соприкосновение с нагретым телом. Увеличивается энергия газа; он при расширении может совершить механическую работу

При теплообмене передача энергии происходит на микроскопическом уровне, при столкновениях молекул. Результат каждого отдельного столкновения предсказать невозможно. Но **в среднем**, с макроскопической точки зрения, при соударении энергичных молекул нагретого тела со стенками сосуда с газом энергия переходит от нагретого тела к газу. В результате тепловая энергия обязательно перетекает от горячего тела к газу

Теплота представляет собой особую форму движения материи.

Хотя теплота и связана с молекулярным механическим движением, но этим не исчерпывается ее сущность

В механике переменными являются координаты и импульсы (скорости) частиц.

В термодинамике такое описание оказалось неприемлемым. В число переменных (параметров) в термодинамике потребовалось ввести **температуру**

Температура определяет направление перехода теплоты,
то есть выступает как мера нагретости тела

Параметры

Для определения состояния системы в термодинамике используются параметры (**термодинамические переменные**):

Экстенсивн

зависят от количества вещества (V, m, μ)

Интенсивны

не зависят от количества вещества (T, p)

Параметры измеряются на опыте

Параметры системы не являются независимыми друг от друга, они связаны **уравнением состояния**

Уравнение состояния – уравнение вида:
 $f(p, V, T) = 0$, связывающее параметры системы

В основе термодинамики лежат основанные на опыте законы (начала) термодинамики

В термодинамике нет моделей, теоретических предположений о строении вещества или о механизме процессов.

Свойства вещества – теплоёмкость, температурные коэффициенты объёмного и линейного расширения, и т.д. – определяются из опыта

Закон теплового равновесия (нулевое начало термодинамики)

Понятие теплового равновесия является одним из главнейших исходных термодинамических понятий.

Опыт показывает, что **если системы 1 и 2 находятся в тепловом равновесии с системой 3, то системы 1 и 2 будут также в тепловом равновесии друг с другом.**

Значение этого закона заключается в том, что он приводит к выводу о существовании **температуры** как характеристики теплового равновесия системы.

Температура есть присущая каждому состоянию равновесия интенсивная величина

Внутренняя энергия

Одно из важных понятий – внутренняя энергия системы U . Внутренняя энергия тела – это полная энергия тела, за исключением кинетической энергии движения тела как целого (движения центра масс и вращения тела как целого) и потенциальной энергии тела во внешних полях

Внутренняя энергия системы – это функция состояния, то есть однозначно определяется состоянием системы.

Изменение внутренней энергии системы в каком-либо процессе не зависит от пути перехода, а только от начального и конечного состояния; а в замкнутом процессе, когда система возвращается в исходное состояние, изменение внутренней энергии равно нулю

Первое начало термодинамики

Внутреннюю энергию системы можно изменить за счёт:

- 1) совершения над системой работы;
- 2) сообщения системе теплоты:

$$dU = \delta Q + \delta A_{\text{внешних сил}}$$

$$\Delta U = Q + A_{\text{внешних сил}}$$

$$\delta A = -\delta A_{\text{внешних сил}}$$

$$\delta Q = \delta A + dU$$

$$Q = A + \Delta U$$

Количество теплоты, сообщённое системе, идёт на приращение её внутренней энергии и на работу системы против внешних сил

Теплоёмкость

Теплоёмкость тела

(полная) –

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT}$$

количество теплоты, которое нужно сообщить системе (телу) для того, чтобы нагреть на 1 кельвин

$$[C_{\text{тела}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Молярная теплоёмкость

–

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

(теплоёмкость моля вещества) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному молю вещества для того, чтобы нагреть на 1 кельвин

$$[C] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Удельная теплоёмкость

–

$$c = \frac{\delta Q}{m \cdot dT}$$

(теплоёмкость единицы массы вещества) – количество теплоты, которое нужно сообщить единице массы вещества для того, чтобы нагреть на 1 кельвин

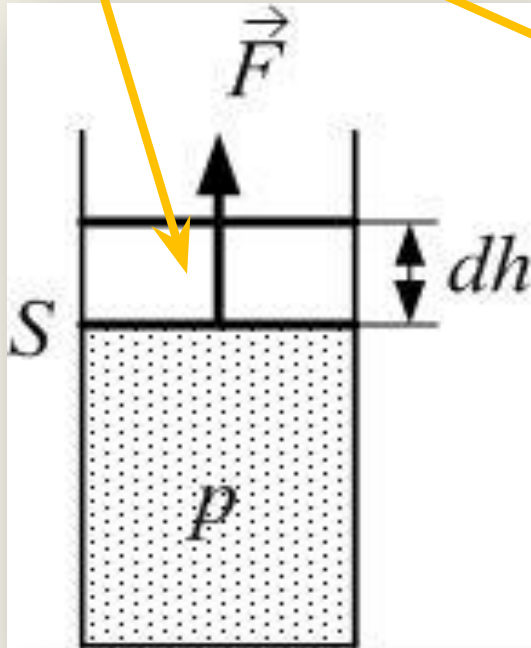
$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Связь между теплоёмкостями

$$C = \frac{\delta Q}{\nu \cdot dT} = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} \cdot dT} = \mu \cdot \frac{\delta Q}{m \cdot dT} \longrightarrow c = \frac{C}{\mu}$$

Работа идеального газа при изменении объёма

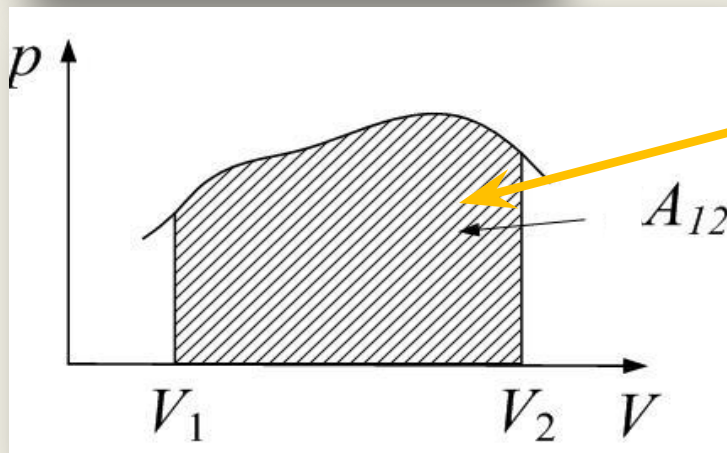
$$dV = S \cdot dh$$



При подъёме поршня на малую высоту dh сила давления газа $F=pS$ совершит работу $\delta A = F \cdot dh$

$$\delta A = pS \cdot dh$$

$$\delta A = p \cdot dV$$



$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

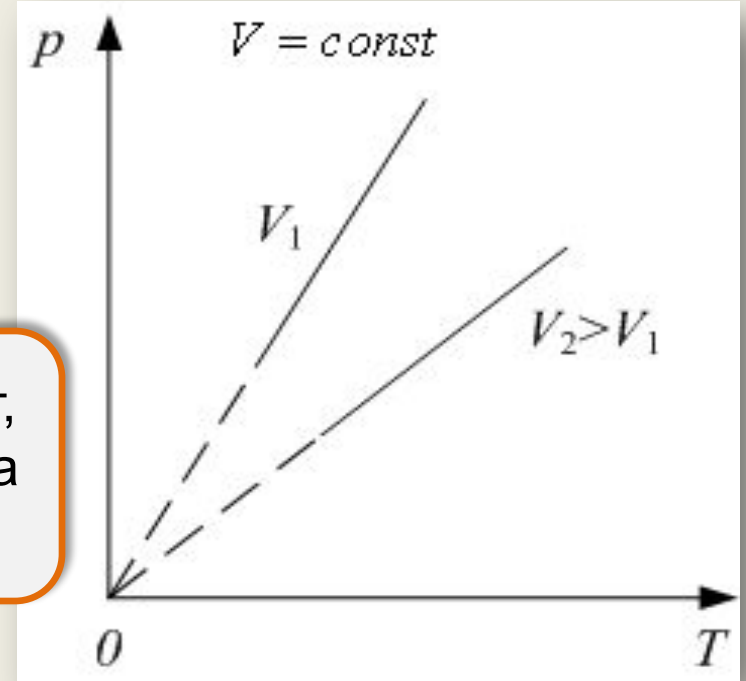
Работа равна площади под графиком $p=f(V)$

Работа газа в
изопроцессах
Изохорический
процесс



$$V = const$$

Изменения объёма нет,
следовательно, работа
не совершается:



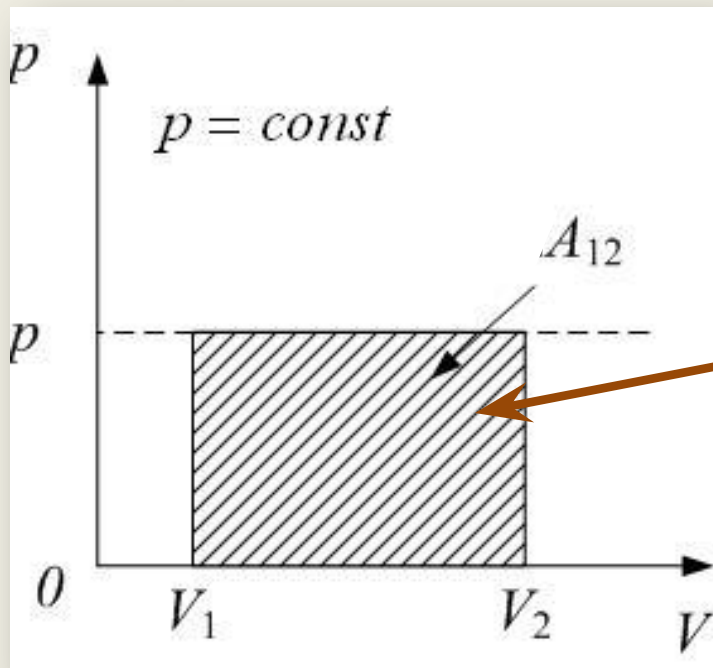
$$dV = 0$$

$$\delta A = p dV = 0$$

$$A = 0$$

Работа газа в изопроцессах

Изобарический процесс



$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1)$$

$$A_{12} = p \cdot \Delta V$$

$$\begin{cases} p \cdot V_1 = \nu \cdot RT_1 \\ p \cdot V_2 = \nu \cdot RT_2 \end{cases}$$



$$A_{12} = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1$$

$$A_{12} = \nu \cdot RT_2 - \nu \cdot RT_1 = \nu \cdot R(T_2 - T_1)$$

$$A_{12} = \nu \cdot R \cdot \Delta T$$

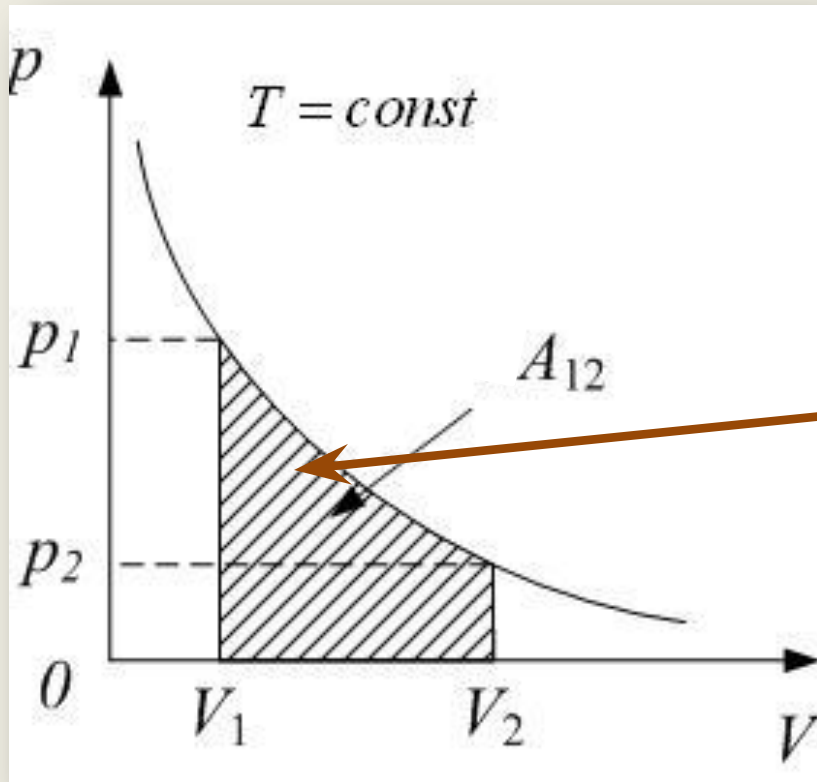
$$R = \frac{\Delta A_{12}}{\nu \cdot \Delta T}$$

$$R = \frac{\delta A}{\nu \cdot dT}$$

**Универсальная газовая
постоянная R
численно равна работе
одного моля
идеального газа при
изобарном нагревании
на 1 кельвин**

Работа газа в изопроцессах

Изотермический процесс



Без доказательства:

$$A_{12} = \nu \cdot RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$A_{12} = \nu \cdot RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Применение первого начала термодинамики к изопроцессам с идеальным газом

$$\delta Q = \delta A + dU$$

1) Изохорический процесс

$$V = const \implies \begin{matrix} \delta A = 0 \\ A = 0 \end{matrix} \implies \delta Q = dU$$

$$U = \nu \cdot \frac{i}{2} \cdot RT$$

$$\delta Q = dU = \nu \cdot \frac{i}{2} \cdot R \cdot dT$$

Молярная теплоёмкость при постоянном объёме:

$$C_V = \frac{\delta Q}{\nu \cdot dT} = \frac{dU}{\nu \cdot dT} \longrightarrow C_V = \frac{i}{2} R$$

В интегральном виде:

$$Q = \Delta U = \nu \cdot C_V \cdot \Delta T = \nu \cdot \frac{i}{2} \cdot R \cdot \Delta T$$

Применение первого начала термодинамики к изопроцессам с

идеальным газом

2) Изобарический процесс

$$p = const$$

$$\begin{cases} \delta A = \nu \cdot R \cdot dT \\ dU = \nu \cdot C_V \cdot dT \end{cases} \Rightarrow \delta Q = \delta A + dU = \nu \cdot R \cdot dT + \nu \cdot C_V \cdot dT$$
$$\delta Q = \nu \cdot (R + C_V) \cdot dT = \nu \cdot C_p \cdot dT$$

Молярная теплоёмкость при постоянном давлении:

$$C_p = \frac{\delta Q}{\nu \cdot dT} \rightarrow C_p = R + C_V$$

Уравнение Майера

Теплоёмкость при постоянном объёме оказывается меньше, так как газ не совершает работу, и для нагревания газа на 1 К теплоты требуется меньше: как раз на величину R , имеющей смысл работы одного моля газа при постоянном давлении

$$C_p = R + C_V = R + \frac{i}{2} R = \frac{i+2}{2} R$$

Применение первого начала
термодинамики к изопроцессам с
идеальным газом

3) Изотермический
процесс

$$T = const$$

$$dT = 0 \quad \Rightarrow \quad dU = \nu \cdot C_V \cdot dT = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta U = 0$$

$$\delta Q = \delta A + dU = \delta A = p \cdot dV$$

$$Q = A$$

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

4) Адиабатический процесс

протекает **без теплообмена** с окружающей средой: система не получает и не отдаёт теплоты

$$\delta Q = 0$$

$$Q = 0$$

Адиабатными процессами будут процессы, протекающие
1) в системе с хорошей теплоизоляцией;
2) очень быстрые процессы, – система не успевает обменяться теплотой с окружающей средой за время протекания процесса

По первому началу термодинамики $\delta Q = \delta A + dU = 0$

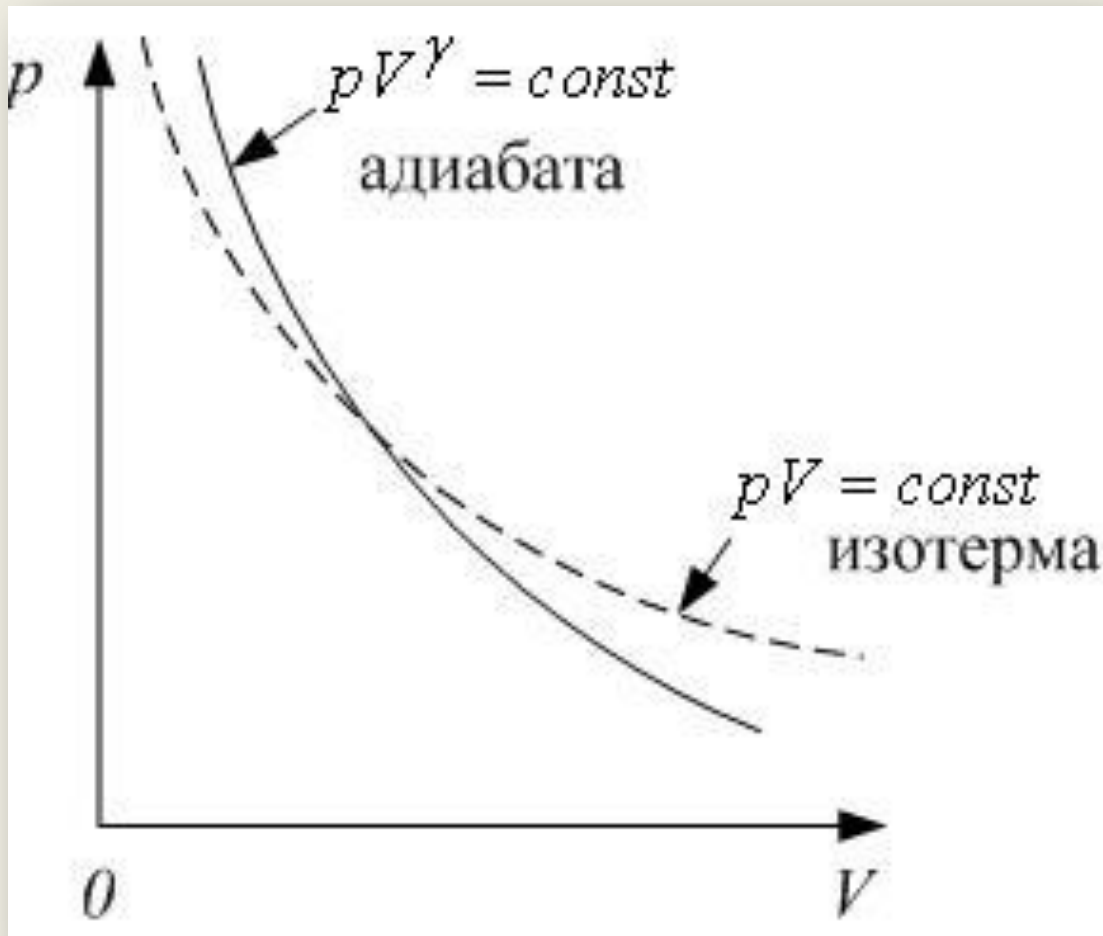
$$\delta A = -dU$$

$$A = \Delta U$$

4) Адиабатический процесс

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

$$T \cdot V^{(\gamma-1)} = \text{const}$$



$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

Показатель Пуассона по
определению



$$\gamma = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V}$$

$$\gamma = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V}$$

$$\gamma = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i}$$

Работа в адиабатическом процессе

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$$

По первому началу термодинамики:

$$A_{12} = -\Delta U = -\nu \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1)$$

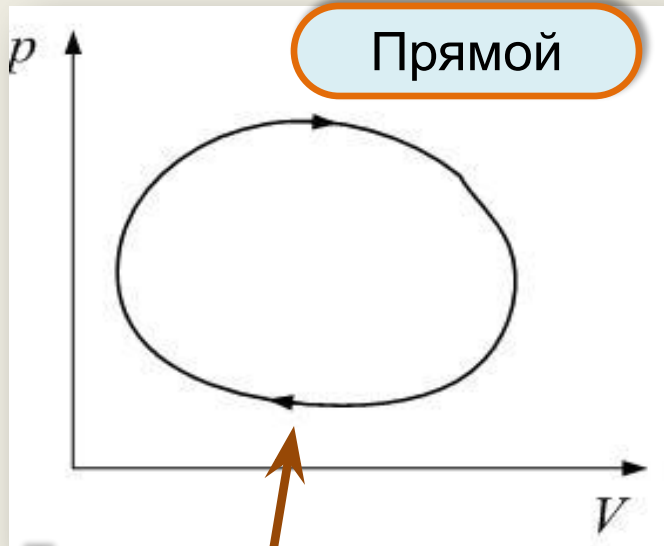
$$T_2 \cdot V_2^{\gamma-1} = T_1 \cdot V_1^{\gamma-1}$$
$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$A_{12} = -\nu \cdot C_V \cdot \left(T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - T_1 \right) = \nu \cdot C_V \cdot T_1 \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right)$$

$$A_{12} = \nu \cdot \frac{R}{\gamma-1} \cdot T_1 \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right) = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right)$$

Круговой процесс (цикл)

Цикл – замкнутый процесс, при котором система, пройдя ряд последовательных состояний, возвращается в исходное состояние



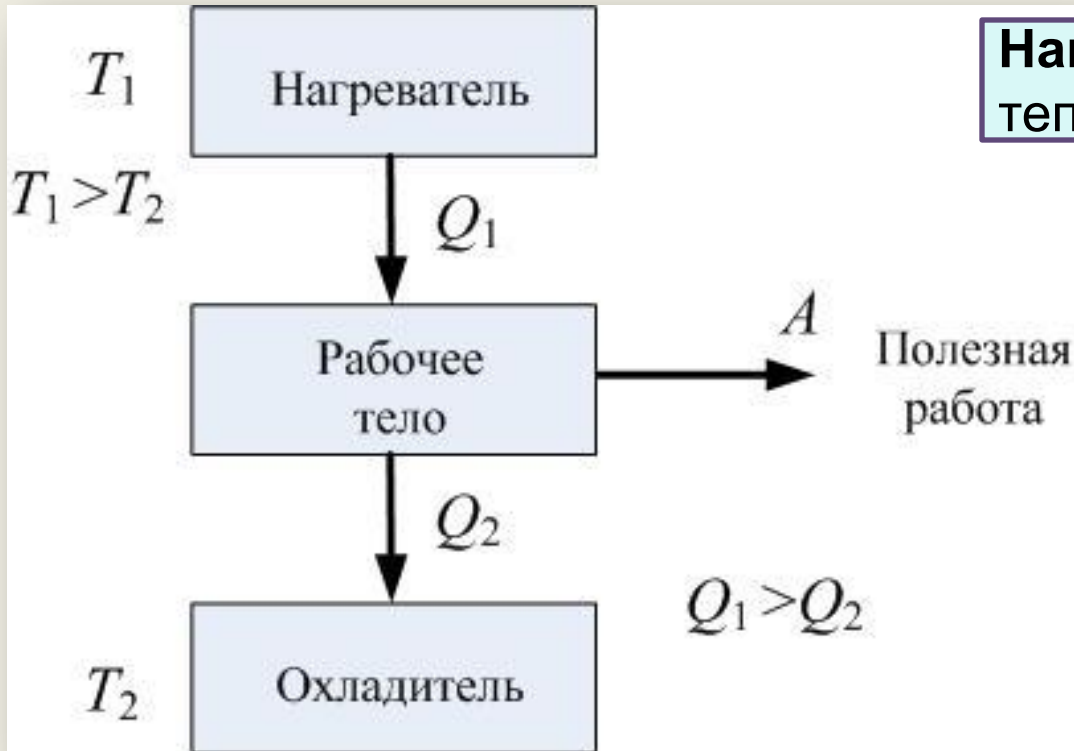
Тепловая машина совершает механическую работу за счёт тепловой энергии.
Непрерывно действующая тепловая машина должна работать периодически



Холодильная машина отводит тепло от более холодного тела к более нагретому; при этом должна затрачиваться некоторая работа

Круговой процесс (цикл)

Тепловая
машина:



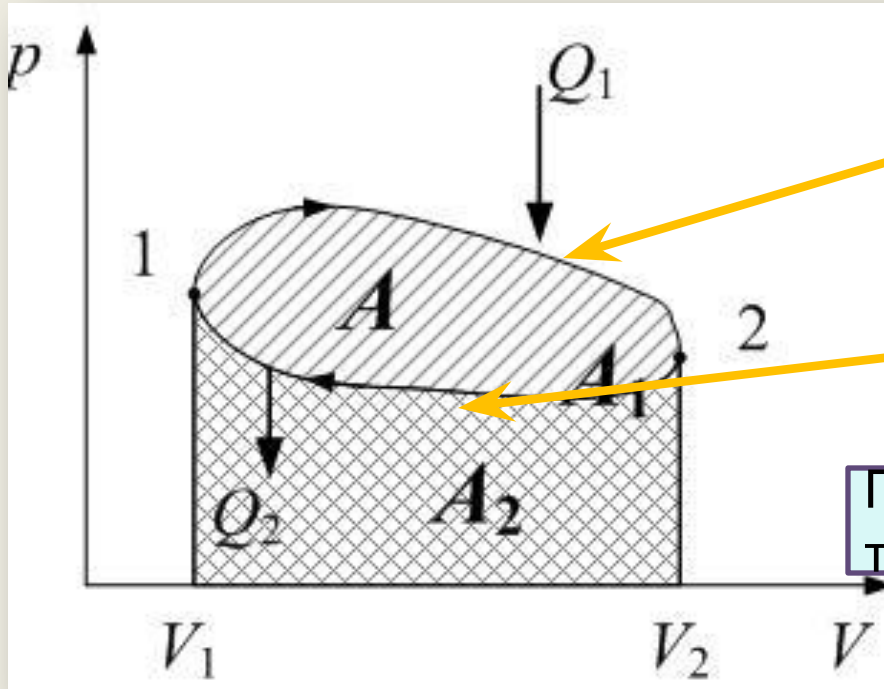
Нагреватель – резервуар
теплоты

Рабочее тело
совершает циклический
процесс

Для того, чтобы рабочее тело возвращалось в исходное состояние, совершив некоторую работу, и цикл мог повторяться, обязательно требуется наличие охладителя (**холодильника**), которому рабочее тело передаёт некоторое количество теплоты

Круговой процесс (цикл)

Тепловая
машина:



Разобьём **прямой** цикл на два процесса:

- 1) расширения от минимального объёма до максимального
- 2) сжатия (2→1).

По первому началу термодинамики:

$$Q_1 = A_1 + \Delta U_{12} = A_1 + (U_2 - U_1)$$

$$-Q_2 = -A_2 + \Delta U_{21} = A_2 + (U_1 - U_2)$$

Количество теплоты,
полученное за весь
цикл:

$$Q = Q_1 + (-Q_2)$$

Круговой процесс (цикл). КПД цикла

Тепловая
машина:

1-2

$$Q_1 = A_1 + \Delta U_{12} = A_1 + (U_2 - U_1)$$

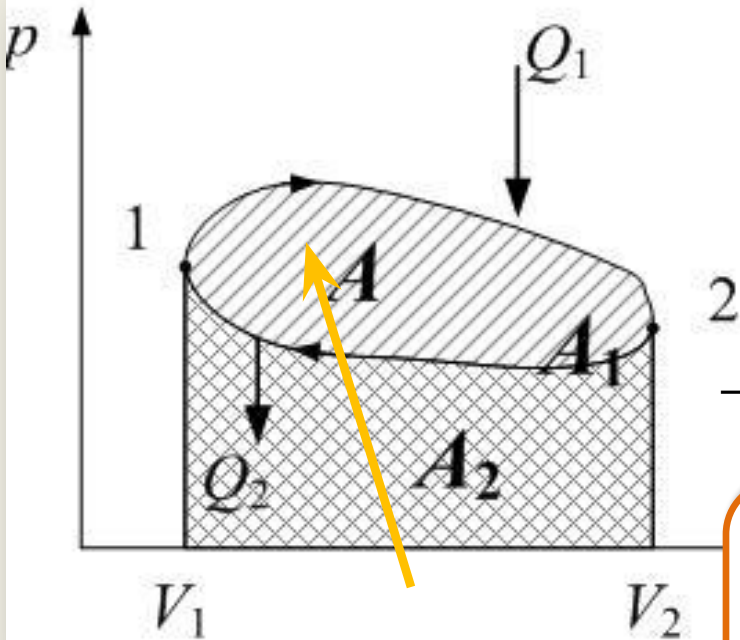
2-1

$$-Q_2 = -A_2 + \Delta U_{21} = -A_2 + (U_1 - U_2)$$

Количество теплоты, полученное за
весь цикл, равно работе за цикл.
Внутренняя энергия не изменилась

$$Q = Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2 = A$$

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



Второе начало

Опыт показывает, что нельзя построить тепловую машину, которая ВСЮ полученную от нагревателя теплоту превращает в работу, то есть машину с КПД=1 (вечный двигатель второго рода)

Формулировка Томсона:

**Невозможен
вечный двигатель**

II рода

Невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу

Формулировка Клаузиуса:

Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от более холодного тела к более нагретому

Теплота сама собой может переходить только от нагретого к холодному

Второе начало

Формулировки Томсона и Кельвина
эквивалентны

**Формулировка
Томсона:**

Невозможен
двигатель с КПД=1

Формулировка Клаузиуса:

Теплота сама собой может
переходить только от нагретого к
холодному

Доказательство:

Если бы теплота Q_2 сама собой, без дополнительной работы перешла от холодильника к нагревателю тепловой машины, то её можно было бы в конце концов превратить в работу, то есть построить тепловую машину с КПД=1

Обратимые и необратимые

Термодинамический процесс называется **обратимым**, если он может проходить как в прямом, так и в обратном направлении; при этом после возвращения системы в исходное состояние в окружающей среде и в самой системе не происходит никаких изменений

Пример обратимого процесса:

абсолютно упругое соударение

Примеры необратимых процессов:

неупругое соударение, трение, диффузия, теплопроводность

Обратимые процессы – идеализация **Равновесный** (квазистатический) процесс представляет собой непрерывную последовательность равновесных состояний.

Любая точка такого процесса – состояние равновесия, из которого система может идти как в прямом, так и в обратном направлении.

Отсюда следует что **любой равновесный процесс обратим**. Только равновесные процессы можно изображать графически

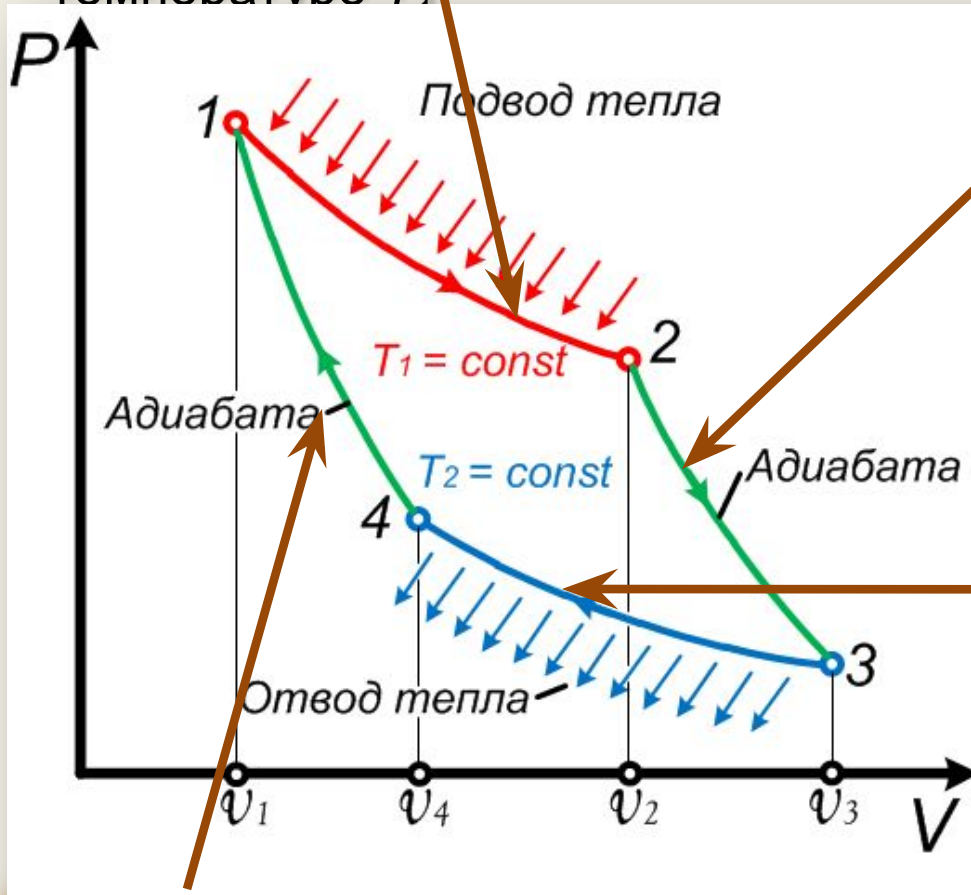
В обратимых процессах система совершает максимальную работу

КПД максимален

Цикл Карно

состоит из двух адиабат и двух изотерм

Изотермическое расширение от объема V_1 до V_2
Газ находится в контакте с нагревателем при температуре T_1 .



Адиабатическое расширение от объёма V_2 до V_3
Конечная температура газа равна температуре охладителя T_2

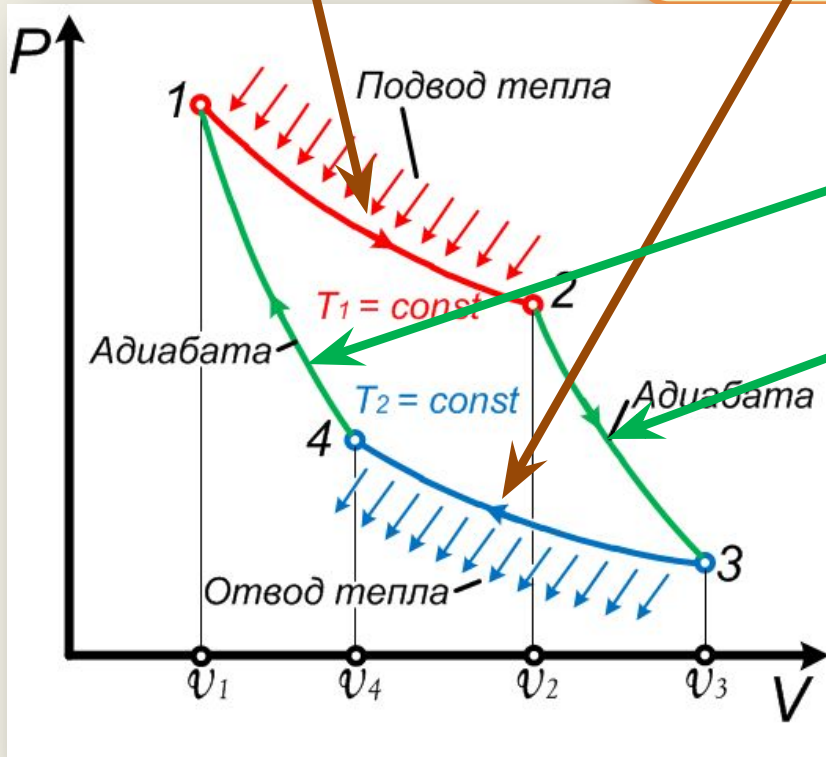
Изотермическое сжатие от объёма V_3 до V_4
Газ находится в контакте с охладителем при температуре T_2

Адиабатическое сжатие от объёма V_4 до V_1
Конечная температура газа равна температуре нагревателя T_1

Цикл Карно. КПД цикла Карно

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

$$Q_2 = A_{34} = \nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$



$$\left. \begin{aligned} T_1 V_1^{\gamma-1} &= T_2 V_4^{\gamma-1} \\ T_1 V_2^{\gamma-1} &= T_2 V_3^{\gamma-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$\eta_K = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$\eta_K = \frac{\nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

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

Теорема Карно

1) КПД цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и определяется только температурами нагревателя и охладителя:

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

2) КПД любого обратимого цикла не больше КПД цикла Карно с теми же температурами нагревателя и охладителя:

$$\eta_{\text{обр.}} \leq \eta_K = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

3) КПД любого необратимого цикла меньше КПД цикла Карно с теми же температурами нагревателя и охладителя:

$$\eta_{\text{необр.}} < \eta_K = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Процесс Уравнение процесса	Первое начало термо- динамики	A	ΔU	Q
$T = const$ Изотерма $P_1 V_1 = P_2 V_2$	$Q = \Delta A$	$\nu \cdot RT \ln \frac{V_2}{V_1};$ $\nu \cdot RT \ln \frac{P_1}{P_2}$	0	$\nu \cdot RT \ln \frac{V_2}{V_1};$ $\nu \cdot RT \ln \frac{P_1}{P_2}$
$V = const$ Изохора $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$	$Q = \Delta U$	0	$\nu \cdot C_V \Delta T;$ $\frac{C_V}{R} V \Delta P$	$\nu \cdot C_V \Delta T;$ $\frac{C_V}{R} V \Delta P$
$P = const$ Изобара $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$Q = A + \Delta U$	$P \Delta V;$ $\nu \cdot R \Delta T$	$\nu \cdot C_V \Delta T;$ $\frac{C_V}{R} P \Delta V$	$\nu \cdot C_P \Delta T;$ $\frac{C_P}{R} P \Delta V$
Адиабата $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$	$A = -\Delta U$	$-\nu \cdot C_V \Delta T;$	$\nu \cdot C_V \Delta T$	0