

ЛЕКЦИЯ 11

1. Внутренняя энергия идеального газа
2. Внутренняя энергия многоатомного газа
3. Работа в термодинамике
4. Работа газа при изотермическом процессе
5. Первое начало термодинамики
6. Применение первого закона термодинамики
7. Теплоемкость

1. Внутренняя энергия идеального газа.

Газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул, называется *одноатомным*. К одноатомным газам относятся инертные газы - гелий, неон, аргон. В случае идеальных газов пренебрегают силами взаимодействия молекул, т.е. их потенциальная энергия полагается равной нулю, поэтому внутренняя энергия теплового движения представляется собой кинетическую энергию теплового движения молекул.

$$U = E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{kN} = NE_k$$

Ранее было показано, что средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы (одноатомной) равна

$$E = \frac{3}{2}kT$$

Определим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа массой m . Для этого среднюю кинетическую энергию одного атома надо умножить на число атомов. В 1 моле содержится N_A атомов, в газе массой m содержится

$$\nu = \frac{m}{M} \text{ молей, } \nu = \frac{N}{N_A}; \quad N = \frac{m}{M} N_A$$

поэтому внутренняя энергия идеального одноатомного газа будет равна

$$U = \frac{m}{M} N_A * \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} * \frac{m}{M} RT$$

$$\text{т.к. } kN_A = R, \text{ тогда } \Delta U = \frac{3}{2} * \frac{m}{M} R \Delta T$$

т.е. изменение внутренней энергии идеального газа пропорциональна массе газа и изменению его термодинамической температуре.

2. Внутренняя энергия многоатомного газа.

Молекула одноатомного газа рассматривается как материальная точка, т.к. масса атома сосредоточена в основном в ядре, размеры которого малы. Положение одноатомной молекулы в пространстве задается тремя координатами.

Говорят, что одноатомный газ имеет три степени свободы ($i=3$). Эта молекула находится в хаотическом движении, все направления движения являются равноправными, т.е. средняя кинетическая энергия хаотического теплового движения молекулы равномерно распределена между тремя степенями свободы.

На каждую степень свободы поступательного движения одноатомной молекулы приходится одинаковая кинетическая энергия, равная $1/2 kT$.

Молекула двухатомного газа представляет собой два атома, жестко связанных между собой. Эти молекулы не только движутся поступательно, но и вращаются. Такая молекула кроме трех степеней свободы поступательного движения имеет две степени свободы вращательного движения, т.е. $i=5$. Если газ многоатомный, то $i=6$.

Внутренняя энергия многоатомного газа представляет собой кинетическую энергию всех движений частиц. Все степени свободы многоатомной молекулы являются равноправными, поэтому они вносят одинаковый вклад в ее среднюю кинетическую энергию:

$$E = \frac{i}{2} kT$$

Внутренняя энергия многоатомного идеального газа массы m равна

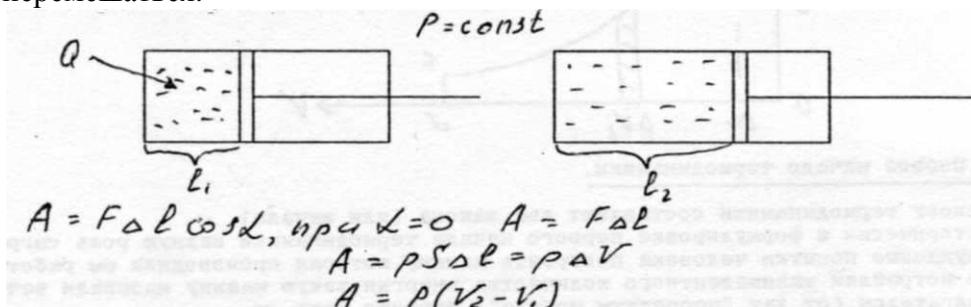
$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$$

3. Работа в термодинамике.

В современном производстве широкое распространение получили тепловые двигатели, в которых энергия, выделяемая при сгорании топлива, превращается в механическую. Процесс превращения энергии в тепловых двигателях осуществляется при помощи расширения пара или газа.

Чтобы понять принцип действия тепловых двигателей, необходимо рассмотреть условия, при которых газ может выполнять работу, и знать, как ее можно вычислить.

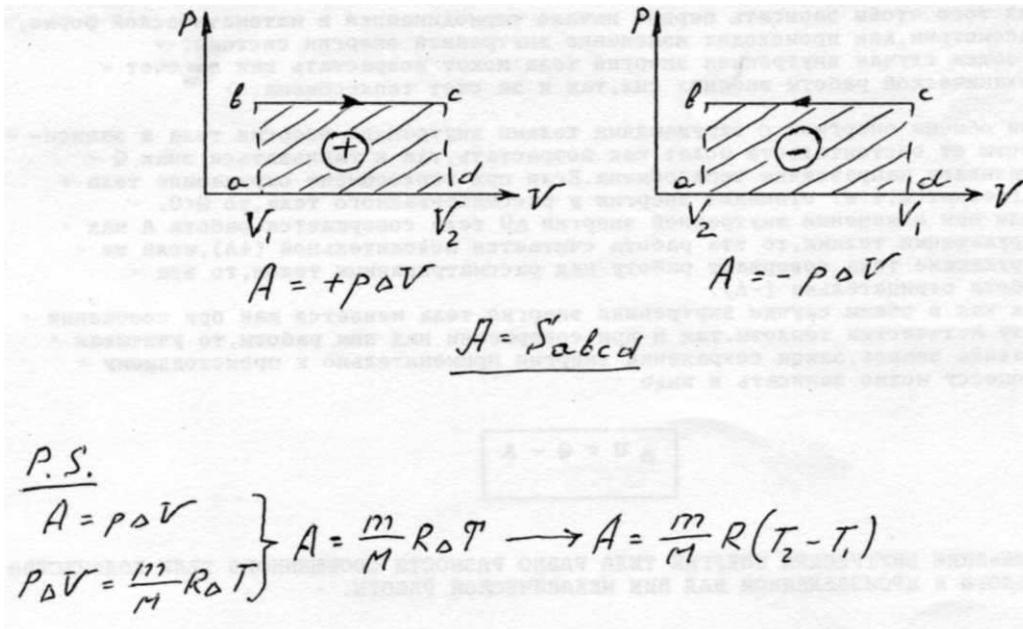
Допустим, что газ нагревается изобарически - при постоянном давлении и что некоторая его масса заключена в цилиндр с подвижным поршнем, который может без трения перемещаться.



т.е. работа, совершаемая газом при изобарическом расширении против внешних сил, равна произведению давления газа на приращение его объема. Эта работа положительна. Если же газ сжимается, то работа силы, с которой газ действует на поршень, отрицательна (т.к. $\Delta V < 0$).

$$A = -p \Delta V$$

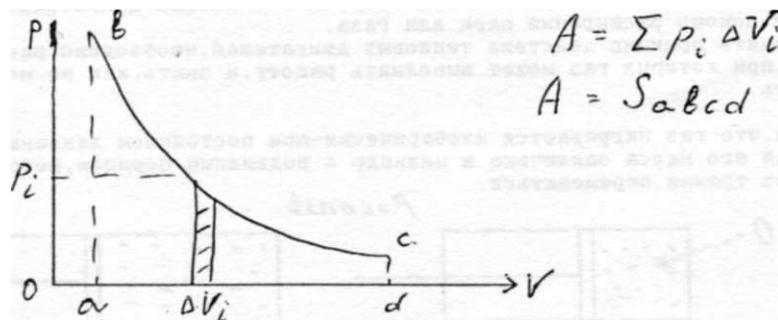
Графическое истолкование работы при изобарном процесс:



4. Работа газа при изотермическом процессе.

При изменении объема газа часто изменяется и его давление. Как в этом случае найти работу?

Для вычисления работы воспользуемся графическим методом



5. Первое начало термодинамики.

Основу термодинамики составляют два закона (или начала).

Исторически в формулировке первого начала термодинамики важную роль сыграли неудачные попытки человека построить машину, которая производила бы работу, не потребляя эквивалентного количества энергии; такую машину называли вечным двигателем (от лат. "перпетуум мобиле") первого рода.

Первое начало термодинамики формулируют в виде следующего утверждения: *невозможно построить «перпетуум мобиле» первого рода.*

Первое начало термодинамики - это закон сохранения и превращения энергии;
при разнообразных процессах, протекающих в природе, энергия не возникает из ничего и не уничтожается, но превращается лишь из одних видов в другие.

Для того чтобы записать первое начало термодинамики в математической форме, рассмотрим, как происходит изменение внутренней энергии системы.

В общем случае внутренняя энергия тела может возрастать как за счет механической работы внешних сил, так и за счет теплообмена.

При обмене энергией с окружающими телами внутренняя энергия тела в зависимости от обстоятельств может как возрастать, так и уменьшаться: знак Q указывает направление теплообмена.

Если при теплообмене окружающие тела нагреваются, т.е. отнимают энергию у рассматриваемого тела, то $Q < 0$. Если при изменении внутренней энергии тела совершается работа A над окружающими телами, то эта работа считается положительной ($+A$), если же окружающие тела совершают работу над рассматриваемым телом, то эта работа отрицательна ($-A$).

Так как в общем случае внутренняя энергия тела меняется как при сообщении телу количества теплоты, так и при совершении над ним работы, то учитывая правила знаков, закон сохранения энергии применительно к происходящему процессу можно записать в виде:

$$\Delta U = Q - A$$

ИЗМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ТЕЛА РАВНО РАЗНОСТИ СООБЩЕННОГО ТЕЛУ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ И ПРОИЗВЕДЕННОЙ НАД НИМ МЕХАНИЧЕСКОЙ РАБОТЫ.

Закон можно записать в виде

$$Q = \Delta U + A$$

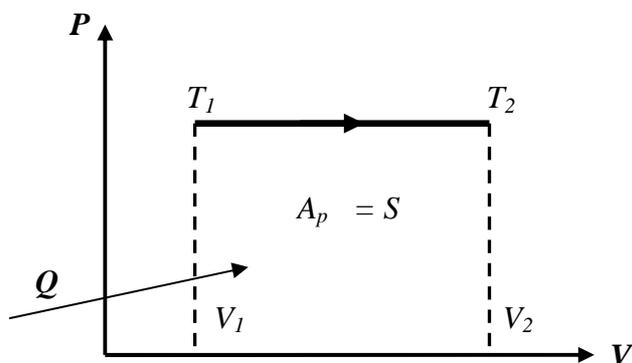
КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, СООБЩЕННОЕ ТЕЛУ, ИДЕТ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ЕГО ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ И НА СОВЕРШЕНИЕ ТЕЛОМ РАБОТЫ НАД ВНЕШНИМИ СИЛАМИ.

Так формулируется первое начало термодинамики - закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам.

6. Применение первого закона термодинамики.

а. изобарный процесс.

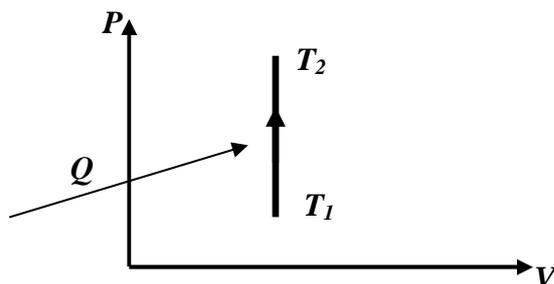
$$P = \text{const}, T_2 > T_1, \Delta U > 0, A > 0. \quad Q = U + A$$



Передаваемое газу количество теплоты идет на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы при постоянном давлении.

б. изохорный процесс

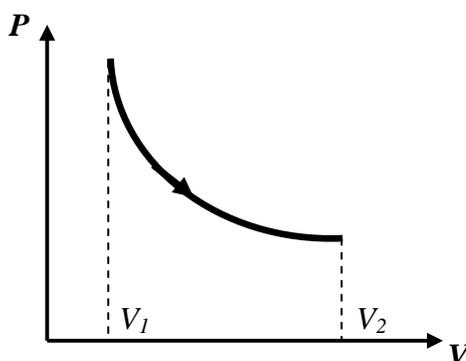
$$V = \text{const}, \Delta V = 0, T_2 > T_1, \Delta U > 0, A = p\Delta V = 0. \quad Q = \Delta U$$



Количество теплоты, передаваемое системе равно изменению внутренней энергии.

в. изотермический процесс

$$T = \text{const}, \Delta T = 0, \Delta U = 0, A_T < A_p. \quad Q = A$$



Передаваемое газу количество теплоты идет на совершение работы.

г. адиабатный процесс

Процесс, протекающий в системе, которая не обменивается теплотой с окружающими телами, т.е. процесс в теплоизолированной системе.

При адиабатном процессе $Q = 0$ и изменение внутренней энергии происходит только за счет совершения работы.

$$\Delta U = A$$

Трудно окружить систему оболочкой, абсолютно не допускающей теплопередачу. Но в ряде случаев можно считать реальные процессы очень близкими к адиабатным. Для этого они должны протекать достаточно быстро, так, чтобы за время процесса не произошло заметного теплообмена.

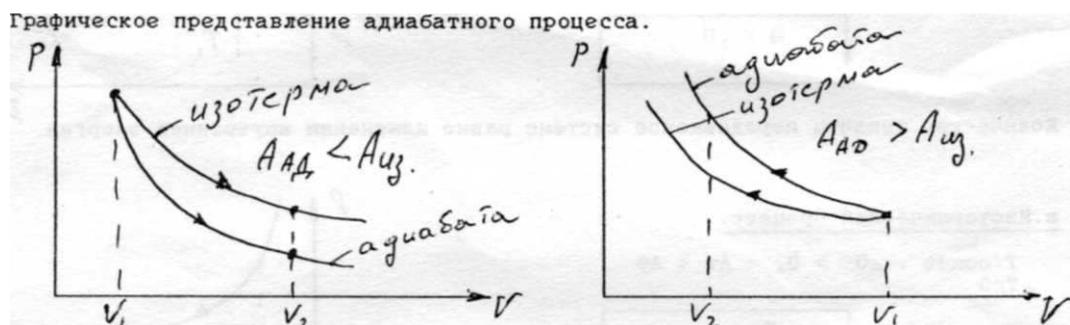
Примеры адиабатных процессов.

1. Нагревание газа при быстром сжатии можно получить с помощью цилиндра на дно которого положили смоченный эфиром кусочек ваты. При быстром опускании поршня, пары эфира воспламеняются

2. Нагревание воздуха при быстром сжатии нашло применение в двигателях Дизеля. В этих двигателях отсутствует система зажигания горючей смеси.

В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр впрыскивается жидкое топливо. К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется. Двигатели имеют больший КПД, чем обычные карбюраторные двигатели.

3. Охлаждение газа при адиабатном расширении происходит в грандиозных масштабах в атмосфере Земли. Это расширение сопровождается значительным охлаждением. В результате водяные пары конденсируются и образуют облака.



При адиабатном расширении температура газа понижается, давление газа с увеличением объема убывает быстрее, чем при изотермическом процессе.	При адиабатном сжатии температура газа повышается, давление газа с уменьшением объема растет быстрее, чем при изотермическом процессе.
---	--

6. Теплоёмкость.

а. теплоёмкость тела

Теплоемкостью тела называют отношение количества теплоты, необходимое для повышения температуры тела от T_1 до T_2 к разности температур.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

б. теплоёмкость вещества.

Нагревая тела с одинаковыми массами, но состоящие из различных веществ, можно обнаружить что для повышения их температуры на 1К требуются различные количества теплоты, т.е. теплоемкость тела зависит от его природы.

Теплоемкость тела пропорциональна его массе. Поэтому характеристикой тепловых свойств вещества является его удельная теплоемкость - величина, равная отношению теплоемкости тела к его массе

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}$$

в. удельная теплоемкость вещества при $V=\text{const}$.

При изохорном процессе изменение внутренней энергии происходит только в результате теплопередачи.

$$\Delta U = Q_V = c_V m \Delta T$$

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} \quad \text{-удельная теплоемкость вещества при } V=\text{const}$$

(зависит от свойств данного вещества и его состояния)

На тело массой m произведем механическое воздействие, приводящее к его нагреванию, и измерим изменение его температуры. Если воздействие на тело проводилось без теплообмена, т.е. $Q=0$, то

$$\Delta U = A$$

тогда

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{A}{m\Delta T}$$

следовательно, для определения удельной теплоемкости вещества при $V=\text{const}$ нужно измерить работу, совершаемую внешними силами.

Такого рода эксперименты были в 1843г. выполнены Д.Джоулем.

г. теплоёмкость идеального газа при $V = \text{const}$.

$$C_V = \frac{\Delta U}{m \Delta T} = \frac{3k \Delta T N}{2m \Delta T} = \frac{3kN}{2m} = \frac{3kN_A}{2M} = \frac{3R}{M}$$

д. теплоёмкость идеального газа при $P = \text{const}$.

$$C_P = \frac{Q_P}{m \Delta T} = \frac{\Delta U + A}{m \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \Delta T} + \frac{A}{m \Delta T} = C_V + \frac{A}{m \Delta T}$$

$$A = P \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T$$

$$C_P = C_V + \frac{R}{M}$$

Теплоёмкость одного моля вещества называется молярной теплоёмкостью.

$$C = Mc \Rightarrow C_P = c_P M \quad \text{и} \quad C_V = c_V M$$

$$C_P = C_V + R \quad \text{т.е.} \quad C_P > C_V$$

Впервые эта зависимость была установлена в 1845 г. Р. Майером.

е. теплоёмкость твёрдых тел при $P = \text{const}$.

На одну степень свободы колебательного движения приходится энергия в 2 раза большая, чем на одну степень свободы поступательного движения, т.е.

$$2 \left(\frac{1}{2} kT \right) = kT \Rightarrow \bar{E}_{\text{кол}} = 3kT \Rightarrow \Delta U = 3kT$$

Пренебрегая работой при изменении объема твёрдого тела, можно считать, что удельная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии

$$C_P = \frac{Q_P}{m \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \Delta T} = \frac{3k \Delta T N}{m \Delta T} = \frac{3kN}{m} = \frac{3R}{M}$$

Молярная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии равна

$$C = cM = 3R$$