
Лекция 14 (2 сем).

1-е начало термодинамики. Адиабатический процесс

1. Количество теплоты и работа. 1-е начало термодинамики.
2. Теплоёмкость вещества. Виды теплоемкостей.
3. Применение I начала термодинамики к изопроцессам идеальных газов.
4. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона в трёх видах.
5. Политропные процессы.

2017

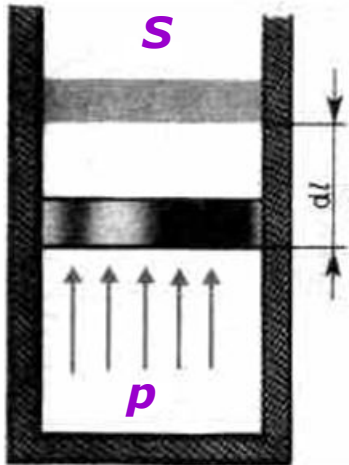
1. Количество теплоты и теплообмен

- **Теплообмен** - процесс передачи внутренней энергии от одного тела к другому **без совершения работы** (без изменения объема).
- **Количество теплоты Q** – это количество энергии, передаваемое системе внешними телами при теплообмене.
 - Сообщение системе теплоты Q не связано с макроскопическими перемещениями тел системы.
 - **Изменение внутренней энергии** при теплообмене состоит в том, что отдельные молекулы более нагретого тела в процессе неупругих столкновений **передают часть своей кинетической энергии** молекулам менее нагретого тела.
- Существует три вида **теплообмена**: теплопроводность, конвекция, излучение.
- **Теплопроводность** – это процесс теплообмена между телами при их непосредственном контакте, обусловленный хаотическим движением частиц тела.
- **Конвекция** - процесс переноса энергии, который осуществляется перемещением слоев жидкости и газа от места с более высокой температурой к месту с более низкой температурой. Конвекция наблюдается только в жидкостях и газах.
- **Излучение** - перенос энергии от одного тела к другому (а также между частями одного и того же тела) путем обмена электромагнитным излучением, т.е. теплообмен, обусловленный процессами испускания, распространения, рассеяния и поглощения электромагнитных волн.
 - **Передача энергии излучением** может осуществляться **при отсутствии** материальной среды, разделяющей поверхности теплообмена, т.е. в полном вакууме.

Работа и внутренняя энергия

- Внутреннюю энергию можно также изменить путем **совершения работы**. Передача внешними телами энергии в форме работы сопровождается макроскопическими перемещениями внешних тел.
- Например:
 1. Если внешняя сила **вызывает деформацию тела**, то при этом изменяются расстояния между частицами, из которых оно состоит, а следовательно, **изменяется потенциальная энергия** взаимодействия частиц.
 - При неупругих деформациях, кроме того, изменяется температура тела, то есть изменяется кинетическая энергия теплового движения частиц.
 - Но при деформации тела совершается работа, которая и является **мерой изменения внутренней энергии тела**.
 2. Внутренняя энергия тела изменяется также при его **неупругом соударении** с другим телом.
 - При неупругом соударении тел их кинетическая энергия уменьшается, она превращается во внутреннюю.
 - **Мерой изменения кинетической энергии** тела, согласно теореме о кинетической энергии, является **работа действующих сил**.
 3. Изменение внутренней энергии тела происходит **под действием силы трения**, поскольку, как известно из опыта, трение всегда сопровождается изменением температуры трущихся тел.
 - Работа силы трения может служить **мерой изменения внутренней энергии**.

Работа термодинамической системы



- Рассмотрим термодинамическую систему, для которой механическая энергия **не изменяется**, а изменяется лишь её внутренняя энергия.
- Допустим, что некоторая система (газ, заключённый в цилиндр под поршнем), обладая внутренней энергией U_1 , получила некоторое **количество теплоты** Q_1 , и перейдя в новое состояние, которое характеризуется внутренней энергией U_2 совершила работу A над внешней средой.
 - Количество теплоты Q_1 считается **положительным**, когда оно **подводится** к системе,
 - а работа A – **положительной**, когда система совершает её **против** внешних сил.
- Определим в общем виде **внешнюю работу**, совершаемую газом при малом изменении его объёма.
- Пусть газ заключён в цилиндрический сосуд, закрытый плотно пригнанным легко скользящим поршнем. Если по каким – либо причинам газ **станет расширяться**, он будет перемещать поршень и **совершать над ним работу**.

Элементарная работа dA , совершаемая газом при перемещении поршня на отрезок dl :

$$dA = Fdl$$

где $F = pS$ – сила давления, с которым газ действует на поршень

Произведем замену:

$$dA = pSdl = pdV$$

Тогда
работа

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} dA = \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

Первое начало термодинамики

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

Выражение справедливо при любых изменениях объёма твёрдых, жидких и газообразных тел.

- В соответствии с законом сохранения энергии **при любом способе перехода** системы из одного состояния в другое **изменение внутренней энергии ΔU будет одинаковым.**
- Это изменение будет равно разности между количеством теплоты Q , полученной системой, и работой A , совершенной системой против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A$$

- **Первое начало термодинамики:** теплота Q , сообщаемая системе, расходуется на изменение её внутренней энергии ΔU и на совершение ею работы A против внешних сил.
- В дифференциальной форме первое начало термодинамики имеет вид:

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

- Если система периодически возвращается в первоначальное состояние, то изменение её внутренней энергии равно **нулю** ($\Delta U=0$).
- Тогда согласно первому началу термодинамики $A=Q$, т.е. **невозможен вечный двигатель первого рода** – периодически действующий двигатель, **который совершал бы большую работу**, чем сообщённая ему извне энергия.

2. Теплоемкость. Виды теплоемкостей

- **Теплоёмкость тела** - величина, равная количеству теплоты Q , которое нужно сообщить телу, чтобы **повысить** его температуру **на один Кельвин**.
- Если при сообщении телу количества теплоты dQ , его температура повышается на dT , то **его теплоемкость** равна:
- Единица измерения теплоёмкости в СИ: [Дж/К]

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

- Из определения следует, что **теплоемкость тела будет зависеть** от химического состава, массы, температуры, а также **от вида процесса**, определяющего изменение состояния тела при сообщении ему теплоты dQ .
- **Теплоёмкость моля вещества = молярная теплоёмкость** – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания **одного моля** вещества на один Кельвин:

$$C^M = \frac{dQ}{\nu dT} \quad \left[\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{К})} \right]$$

- **Удельная теплоёмкость** – это теплоёмкость единицы массы вещества – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания **одного килограмма** вещества на один Кельвин:

$$c^{уд} = \frac{dQ}{m dT} \quad \left[\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})} \right]$$

- Получим связь между молярной и удельной теплоёмкостями одного и того же вещества:

$$\frac{C^M}{c^{уд}} = \frac{m}{\nu}$$



$$C^M = c^{уд} M$$

где M – молярная масса вещества

Теплоемкости при постоянных V и p

- Величина теплоёмкости **зависит от условий**, при которых происходит нагревание тела.
- Если нагревание происходит при постоянном объёме ($V=const$ – изохорный процесс), то **теплоёмкость** называется **теплоёмкостью при постоянном объёме** и обозначается:

$$C_V^M = \left(\frac{dQ}{\nu dT} \right)_{V=const}$$

Молярная теплоёмкость при постоянном **объёме**

и

$$c_V^{уд} = \left(\frac{dQ}{m dT} \right)_{V=const}$$

Удельная теплоёмкость при постоянном **объёме**

- Если нагревание происходит при постоянном давлении ($p=const$ – изохорный процесс), то **теплоёмкость** называется **теплоёмкостью при постоянном давлении** и обозначается:

$$C_p^M = \left(\frac{dQ}{\nu dT} \right)_{p=const}$$

Молярная теплоёмкость при постоянном **давлении**

и

$$c_p^{уд} = \left(\frac{dQ}{m dT} \right)_{p=const}$$

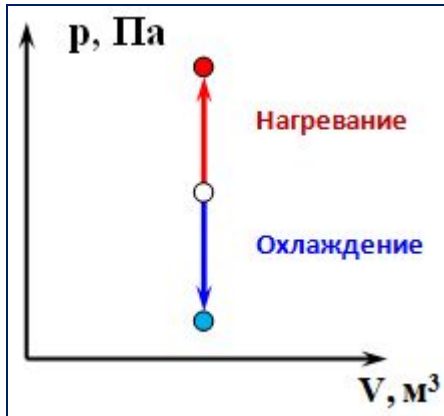
Удельная теплоёмкость при постоянном **давлении**

3. Применение 1-го начала термодинамики в изопроцессах

1. Изохорический процесс $V = const$



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



Изопроцесс

- Если газ нагревается или охлаждается при постоянном объёме, то $dV=0$ и работа внешних сил **равна нулю**:

$$\delta A = p dV = 0 \quad \Rightarrow \quad A_{12} = \int_1^2 \delta A = 0$$

Сообщаемая газу извне теплота Q пойдёт только на увеличение его внутренней энергии U .

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

Но $C_V^M = \left(\frac{dQ}{v dT} \right)_{V=const} \quad \Rightarrow \quad C_V^M = \frac{dU}{v dT} \quad \Rightarrow \quad dU = v C_V^M dT$

Молярная теплоёмкость при постоянном **объёме**

Изменение внутренней энергии газа:

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_V^M v dT$$

Теплоемкости при изохорическом процессе

Изопроцесс

$$V = const$$

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

Если $C_V^M = const$ (для идеального газа справедливо)

$$\Delta U = \nu C_V^M \int_{T_1}^{T_2} dT = C_V^M \nu (T_2 - T_1)$$

Получим выражения для молярной и удельной теплоемкостей идеального газа **при постоянном объеме.**

Вспомним, что для идеального газа изменение внутренней энергии **зависит от** количества степеней свободы i :

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

Тогда **молярная теплоёмкость** при постоянном **объёме**

$$C_V^M = \frac{dU}{\nu dT} = \frac{i}{2} \frac{\nu R dT}{\nu dT} = \frac{i}{2} R$$

Удельная **теплоёмкость** при постоянном **объёме**

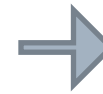
$$c_V^{\nu\partial} = \frac{C_V^M}{M} = \frac{i}{2} \frac{R}{M}$$

Применение 1-го начала термодинамики в изопроцессах

2. Изобарический процесс

Изопроцесс

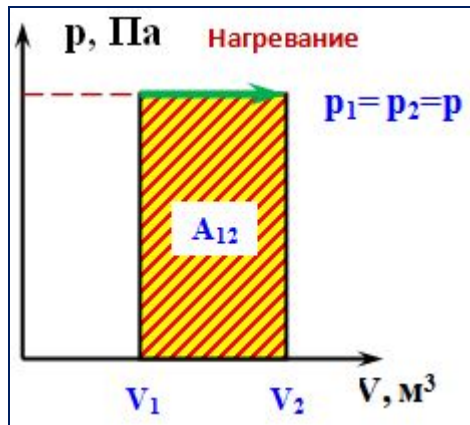
$$p = const$$



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

- Работа при **ПОСТОЯННОМ** давлении:

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1 = \nu RT_2 - \nu RT_1 = \nu R(T_2 - T_1)$$



1-е начало термодинамики в данном случае:

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



$$C_p^M \nu dT = dU + p dV$$

$$C_p^M = \left(\frac{dQ}{\nu dT} \right)_{p=const}$$

Молярная теплоёмкость при
ПОСТОЯННОМ **давлении**

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Продифференцируем при **p=const**:

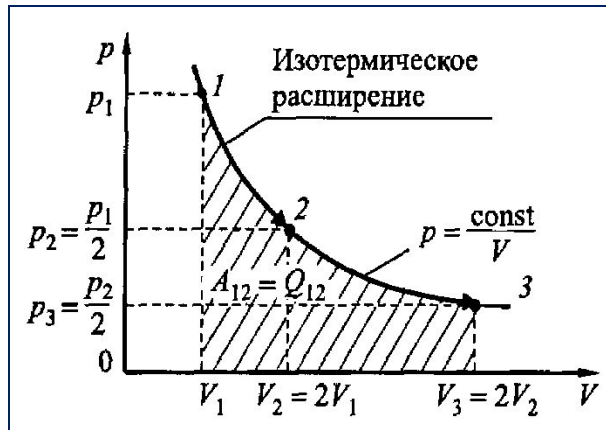
$$p dV = \nu R dT$$

уравнение состояния идеального газа или
уравнение Менделеева – Клапейрона.

$$C_p^M \nu dT = \frac{i}{2} \nu R dT + \nu R dT$$

Применение 1-го начала термодинамики в изопроцессах

3. Изотермический процесс $T = const \rightarrow pV = const$

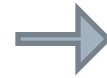


Изопроцесс

□ Работа равна:

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

$$pV = \frac{m}{M} RT$$



$$p = \frac{\nu RT}{V}$$

из уравнения Менделеева-Клапейрона

Работа при **постоянной** температуре:

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} \nu RT \frac{dV}{V} = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

где

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

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

из уравнения Бойля-Мариотта

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

1-е начало термодинамики в данном случае:

$$\delta Q = dU + \delta A$$
 где $dU = 0$ так как **температура не изменяется**

$$\delta Q = \delta A \rightarrow$$

$$Q_{12} = A_{12} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Теплоемкости при изобарическом процессе

Изопроцесс

$$p = const$$

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

Получим выражения для молярной и удельной теплоемкостей идеального газа **при постоянном давлении**.

$$C_p^M \nu dT = \frac{i}{2} \nu R dT + \nu R dT$$

$$C_p^M = \frac{i\nu R dT + 2\nu R dT}{2\nu dT} = \frac{i+2}{2} R$$



$$C_p^M = \frac{i+2}{2} R$$

Удельная **теплоёмкость** при **постоянном давлении**:

$$c_p^{уд} = \frac{C_p^M}{M} = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}$$

Тогда **молярная теплоёмкость** при постоянном **давлении**

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



$$C_p^M = C_V^M + R$$

Вывод: Молярная теплоемкость C_p газа в процессе с постоянным давлением **всегда больше** молярной теплоемкости C_V в процессе с постоянным объемом

Мы получили **формулу Майера для молярных теплоемкостей**

Подготовим формулы для изопроеессов

1-е начало термодинамики $Q = \Delta U + A$	Изохорный процесс $V = \text{const}$	Изобарный процесс $p = \text{const}$	Изотермический процесс $T = \text{const}$
Работа A	ноль	$A = \nu R \Delta T$	$A = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$ $A = \nu R T \ln \frac{p_1}{p_2}$
Изменение внутренней энергии ΔU	$\Delta U = \nu C_V^M \Delta T$	$\Delta U = \nu C_V^M \Delta T$	ноль
Теплота Q	$Q = \nu C_V^M \Delta T$ $Q = \nu \frac{i}{2} R \Delta T$	$Q = \nu C_p^M \Delta T$ $Q = \nu \frac{i+2}{2} R \Delta T$	$Q = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$ $Q = \nu R T \ln \frac{p_1}{p_2}$

4. Адиабатический процесс

- **Адиабатический процесс** - процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Подведённое к телу количество теплоты: $Q=0$ или $\delta Q=0$.
- Определим **уравнение состояния** - уравнение, связывающее параметры идеального газа при адиабатическом процессе.
- Первое начало термодинамики можно записать в следующем виде:

$$\delta Q = dU + \delta A \rightarrow \delta A = -dU \quad \text{где} \quad \delta A = pdV$$

Вывод: Работа газа при адиабатическом процессе происходит за счёт убыли внутренней энергии.

Учтем, что: $dU = \nu C_V^M dT \rightarrow pdV = -\nu C_V^M dT$

давление из уравнения Менделеева-Клапейрона

$$p = \frac{\nu RT}{V} \rightarrow -\nu C_V^M dT = \nu RT \frac{dV}{V}$$

$$-C_V^M dT = RT \frac{dV}{V}$$

Разделим переменные T и V : $\frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_V^M} \frac{dV}{V}$

Возьмем определенный интеграл:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_V^M} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_V^M} \ln \frac{V_2}{V_1}$$

4. Адиабатический процесс -2

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_V^M} \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$C_p^M = C_V^M + R$$

формула
Майера

□ Зная формулу Майера, преобразуем отношение:

$$\frac{R}{C_V^M} = \frac{C_p^M - C_V^M}{C_V^M} = \frac{C_p^M}{C_V^M} - 1 = \gamma - 1$$

где γ - адиабатическая постоянная

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

Тогда

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -(\gamma - 1) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Избавимся от логарифмов – то, что перед логарифмом есть показатель степени логарифма:

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

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \rightarrow TV^{\gamma-1} = const$$

Один из видов записи уравнения Пуассона

2. Уравнение Пуассона – формула адиабатического процесса

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \rightarrow TV^{\gamma-1} = const$$

- Перейдём от этого уравнения к уравнению в переменных p, V

Из уравнения Менделеева-Клапейрона температура T :

$$pV = \frac{m}{M} RT \rightarrow T = \frac{pV}{\nu R} \quad \text{где в знаменателе константы}$$

Тогда $\frac{pV}{\nu R} V^{\gamma-1} = const \rightarrow \frac{pV^\gamma}{\nu R} = const \rightarrow pV^\gamma = const$

Основной вид записи уравнения Пуассона

- Перейдём от этого уравнения к уравнению в переменных p, T

Из уравнения Менделеева-Клапейрона объем V : $V = \frac{\nu RT}{p}$

$$pV^\gamma = const \rightarrow p \left(\frac{\nu RT}{p} \right)^\gamma = const \rightarrow p \left(\frac{T}{p} \right)^\gamma = const$$

$$p^{1-\gamma} T^\gamma = const$$

Третий из видов записи уравнения Пуассона

Работа газа при адиабатическом процессе

- **Адиабатический процесс** - процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Подведённое к телу количество теплоты: $Q=0$ или $\delta Q=0$: $\delta A = -dU$

Учтем, что: $dU = \nu C_V^M dT \rightarrow \delta A = -\nu C_V^M dT$

Возьмем
определенный
интеграл:

$$A_{12} = \int_{T_1}^{T_2} -\nu C_V^M dT \rightarrow A_{12} = -\nu C_V^M \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$A_{12} = -\nu C_V^M (T_2 - T_1) = \frac{m}{M} C_V^M (T_1 - T_2) \quad \text{где} \quad C_V^M = \frac{R}{\gamma - 1}$$

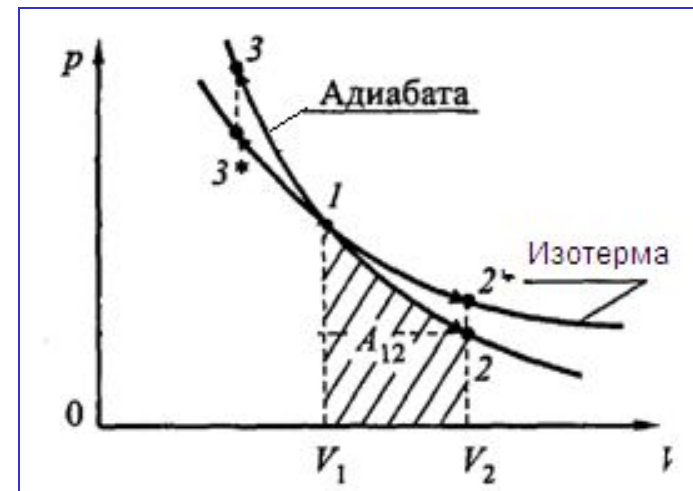
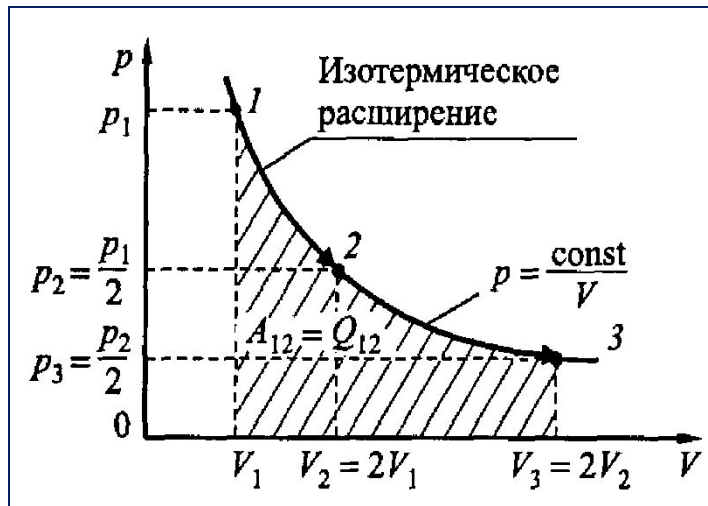
Учтем, что: $TV^{\gamma-1} = const \rightarrow T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \rightarrow T_2 = \frac{T_1 V_1^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}}$

$$A = \nu \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] \rightarrow A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона температура T_1 :

$$\nu R T_1 = p_1 V_1$$

Сравнение изотермического и адиабатического процессов



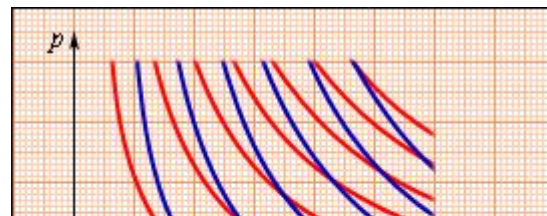
Изотермический процесс

$$T = const$$

Изопроцесс

$$pV = const$$

Закон Бойля-
Мариотта



Адиабатический процесс

$$Q=0$$

Квазистационарный процесс

$$pV^\gamma = const$$

Уравнение
Пуассона

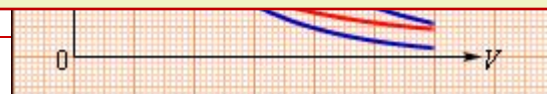


График адиабаты более крутой, чем изотермы

Подитожим для всех процессов

1-е начало термодинамики $Q = \Delta U + A$	Изохорный процесс $V = \text{const}$	Изобарный процесс $p = \text{const}$	Изотермический процесс $T = \text{const}$	Адиабатический процесс $Q = 0$
Работа A	ноль	$A = \nu R \Delta T$	$A = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$ $A = \nu R T \ln \frac{p_1}{p_2}$	$A = \nu \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$ $A = \frac{pV_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$
Изменение внутренней энергии ΔU	$\Delta U = \nu C_V^M \Delta T$	$\Delta U = \nu C_V^M \Delta T$	ноль	$\Delta U = \nu \frac{RT_1}{1 - \gamma} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$ $\Delta U = \frac{pV_1}{1 - \gamma} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$
Теплота Q	$Q = \nu C_V^M \Delta T$ $Q = \nu \frac{i}{2} R \Delta T$	$Q = \nu C_p^M \Delta T$ $Q = \nu \frac{i + 2}{2} R \Delta T$	$Q = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$ $Q = \nu R T \ln \frac{p_1}{p_2}$	ноль

3. Политропические (политропные) процессы

- Рассмотренные изохорный, изобарный, изотермический и адиабатический процессы происходят **при постоянной теплоёмкости**.

Политропический процесс - процесс, при котором теплоёмкость тела остаётся постоянной: $C = const$.

Уравнение политропы для идеального газа:

$$pV^n = const \quad \text{где}$$

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$$

Показатель политропы

При $n = \gamma$ уравнение переходит в **уравнение адиабаты**:

$$pV^\gamma = const$$

При $n = 0$ ($C^M = C_p^M$) - в уравнение **изобары**:

$$p = const$$



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

При $n = 1$ ($C^M = \infty$) - в уравнение **изотермы**:

$$pV = const$$

При $n = \infty$ ($C^M = C_v^M$) - в уравнение **изохоры**:

$$V = const$$



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

Работа при политропическом (политропном) процессе

- Выразим давление p через объем V :

$$pV^n = \text{const} \rightarrow pV^n = p_1V_1^n = p_2V_2^n \quad \text{где } p \text{ и } V \text{ – давление и объем в любом промежуточном состоянии}$$

p_1, V_1 и p_2, V_2 – значения давления и объема газа соответственно в начальном и конечном состояниях

Отсюда

$$p = \frac{p_1V_1^n}{V^n}$$

Тогда работа:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_1V_1^n \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n}$$

- Для случая, когда $n \neq 1$, интеграл равен:

$$A = p_1V_1^n \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = \frac{p_1V_1^n}{n-1} \left(\frac{1}{V_1^{n-1}} - \frac{1}{V_2^{n-1}} \right) = \frac{p_1V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]$$

Для адиабаты

Для политропы

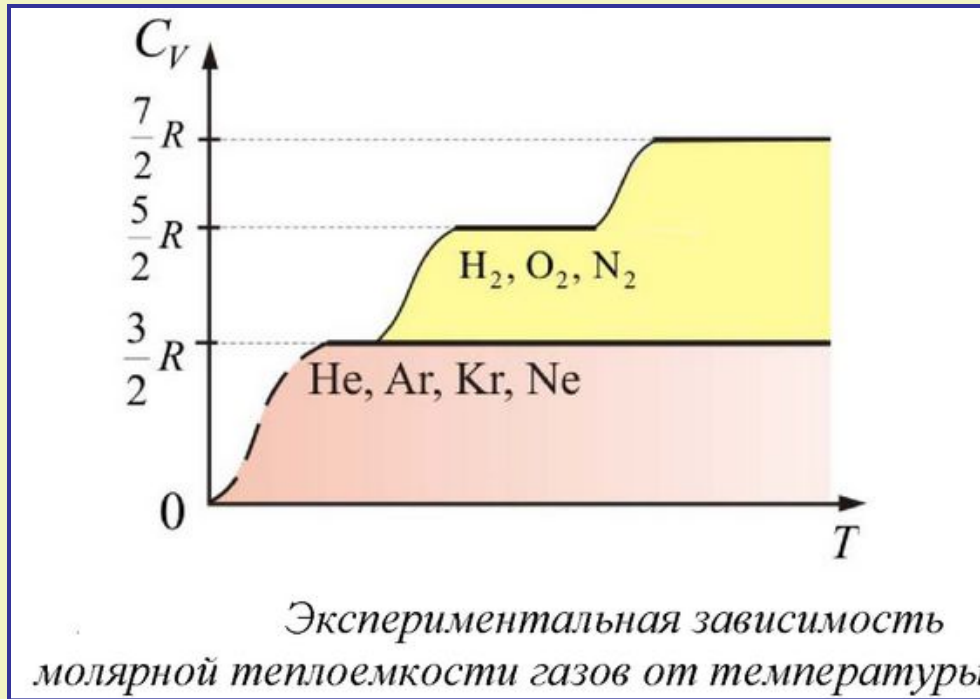
По зако

$$A = \frac{p_1V_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]$$

$RT_1 \rightarrow$

$$A = \nu \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]$$

Объяснение зависимости молярной теплоемкости от температуры

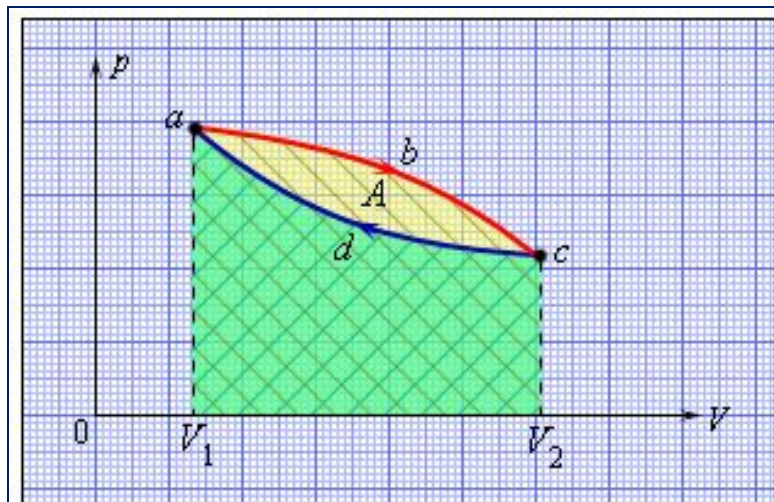


- Но энергия колебаний молекулы водорода велика, поэтому **при комнатной температуре** молекулы находятся в подавляющем большинстве на нижнем колебательном уровне, и колебательная степень свободы оказывается "**вымороженной**".
- Из-за этого теплоемкость водорода при комнатной температуре близка к $5R/2$, и лишь при температурах **свыше 5000 К** все степени свободы эффективно возбуждены и теплоемкость подходит к теоретической $7R/2$.
- При понижении температуры до **80 К** вымораживаются и вращательные степени свободы, и теплоемкость водорода падает до $3R/2$.
- ~~Аналогичные явления наблюдаются также в жидкостях и твердых телах.~~

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 $abcd$