

# Термодинамика

## Термодинамика

раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями

### ① ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

#### 1) Внутренняя энергия

$$U [\text{Дж}]$$

сумма энергий всех частиц, из которых состоит тело (молекул, атомов, электронов и т. д.); энергий хаотичного движения и взаимодействия

2)

#### Способы изменения внутренней энергии

1. Совершение работы ( $A$ )
2. Теплопередача ( $Q$ )

#### 3) Внутренняя энергия идеального газа

Идеальный газ — это модель газа, в которой не учитывают межмолекулярные взаимодействия. Поэтому в идеальном газе потенциальная энергия молекул равна нулю

$$E_{p \text{ мол}} = 0$$

$$U_{\text{и.г.}} = \sum E_{k \text{ мол}}$$

Будем считать, что все молекулы обладают одинаковой кинетической энергией  $\bar{E}_k$  (средняя кинетическая энергия)

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

$$N = \frac{m}{\mu} N_a$$

$$U = N \cdot \bar{E}_k$$

$$U = N \cdot \bar{E}_k = \frac{m}{\mu} N_a \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT$$

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT$$

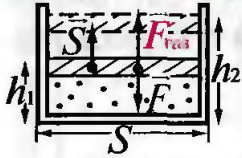
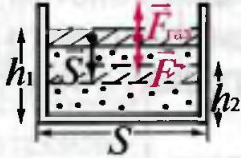
внутренняя энергия  
одноатомного идеального газа

Изменение внутренней энергии при  $m = const$  происходит из-за изменения температуры

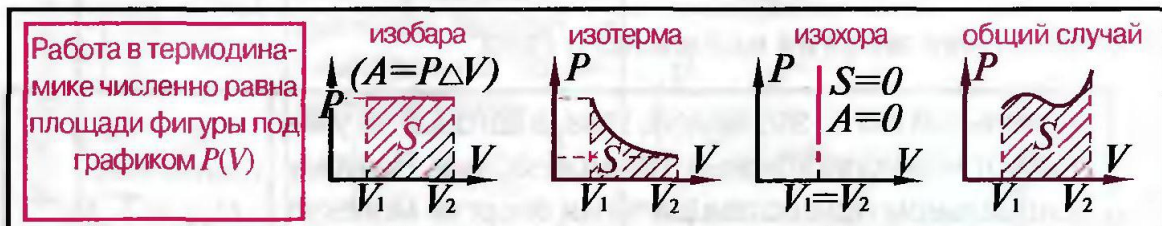
$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

## ② РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

1) При совершении работы газом (над газом) всегда изменяется его объем  
 $\Delta V = V_2 - V_1$

Расширение газа	Сжатие газа	для $p = const$
 $A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$ $P = \frac{F}{S}$	 $A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$ $P = \frac{F}{S}$	$A = p(V_2 - V_1)$ $A = p\Delta V$
<p><b>Работа газа (<math>A'</math>)</b></p> $A' = F_{\text{газ}} (h_2 - h_1) \cos 0^\circ$ $A' = p \cdot S (h_2 - h_1) \cdot 1$ $A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$	<p><b>Работа газа (<math>A'</math>)</b></p> $A' = F_{\text{газ}} (h_1 - h_2) \cos 180^\circ$ $A' = p \cdot S (h_1 - h_2) \cdot (-1)$ $A' = -p(V_1 - V_2) = -p\Delta V$	$A' = -A$
<p><b>Работа над газом (<math>A</math>)</b></p> $A = F (h_2 - h_1) \cos 180^\circ$ $A = p \cdot S (h_2 - h_1) \cdot (-1)$ $A = -p(V_2 - V_1) = -p\Delta V$	<p><b>Работа над газом (<math>A</math>)</b></p> $A = F (h_1 - h_2) \cos 0^\circ$ $A = p \cdot S (h_1 - h_2) \cdot 1$ $A = p(V_1 - V_2) = p\Delta V$	<p>если <math>\Delta V = 0</math>  <math>A = A' = 0</math></p> $A = p\Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T$

## 2) Геометрическое истолкование



## ③ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

**Теплопередача** || изменение внутренней энергии без совершения работы (передача энергии от более нагретых тел к менее нагретым)

**Количество теплоты** || мера изменения внутренней энергии при теплопередаче

$Q$  [Дж]





#### ④ КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ

<p><b>Нагревание (охлаждение)</b></p> $Q = C_m (t_2 - t_1)$ <p>для одноатомного газа:</p> $C_V = \frac{3R}{2\mu} \quad C_p = \frac{5R}{2\mu}$ <p>(при <math>V = \text{const}</math>) (при <math>p = \text{const}</math>)</p>	<p><b>Удельная теплоемкость</b></p> $C [\text{Дж/кг}\cdot\text{К}]$	<p>это количество теплоты, которое поглощается (или выделяется) одним килограммом вещества при изменении температуры на 1К</p>
<p><b>Парообразование (конденсация)</b></p> $Q = r \cdot m$	<p><b>Удельная теплота парообразования</b></p> $r [\text{Дж/кг}]$	<p>это количество теплоты, которое поглощается (выделяется) 1 кг вещества при его превращении в пар (или конденсации), при <math>t = \text{const}</math></p>
<p><b>Плавление (кристаллизация)</b></p> $Q = \lambda \cdot m$	<p><b>Удельная теплота плавления</b></p> $\lambda [\text{Дж/кг}]$	<p>это количество теплоты, которое поглощается (выделяется) 1 кг вещества при его плавлении (или кристаллизации), при <math>t = \text{const} = t_{nz}</math></p>

#### ⑤ ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

##### Закон сохранения энергии

Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно. Она только переходит из одной формы в другую

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые процессы, носит название **1 закона термодинамики**

I.  $\Delta U = Q + A$

Внутренняя энергия системы может изменяться за счет передачи ей количества теплоты ( $Q$ ) и совершенной над системой работы ( $A$ )

II.  $Q = \Delta U + A'$

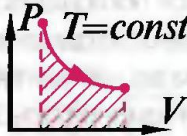
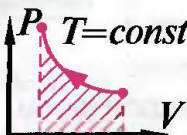
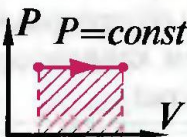
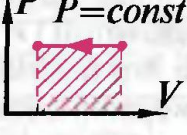
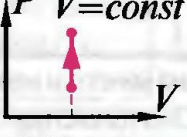



Количество теплоты, переданное системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы ( $\Delta U$ ) и совершение системой работы над внешними телами ( $A'$ )

#### ⑥ АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Это процесс, происходящий **без теплообмена** с внешней средой  $Q = 0$  (быстрота процесса: теплообмен не успевает произойти)



## 7 ПРИМЕНЕНИЕ I ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕССАМ (ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ)

изотермическое расширение		$\Delta T = 0; \Delta U = 0$ (внутренняя энергия не изменяется) $A' > 0$ (газ совершает работу) $Q > 0$ (тепло поглощается)	$Q = A'$ Газ совершает работу за счет поглощения тепла из внешней среды (внутренняя энергия при этом не изменяется)
изотермическое сжатие		$\Delta T = 0; \Delta U = 0$ (внутренняя энергия не изменяется) $A' < 0$ ( $A > 0$ ) (над газом совершают работу) $Q < 0$ (тепло выделяется)	$0 = -Q + A$ Над газом совершается работа, при этом газ выделяет тепло во внешнюю среду (внутренняя энергия не изменяется)
изобарное нагревание		$\Delta T > 0; \Delta U > 0$ (внутренняя энергия увеличивается) $A' > 0$ (газ совершает работу) $Q > 0$ (тепло поглощается)	$Q = \Delta U + A'$ Газ получает тепло из внешней среды. Полученная таким образом энергия тратится на увеличение внутренней энергии и на совершение газом работы
изобарное охлаждение		$\Delta T < 0; \Delta U < 0$ (внутренняя энергия уменьшается) $A' < 0$ ( $A > 0$ ) (над газом совершают работу) $Q < 0$ (выделяется)	$\Delta U = -Q + A$ Над газом совершается работа, при этом газ выделяет тепло во внешнюю среду, а его внутренняя энергия уменьшается
изохорное нагревание		$\Delta T > 0; \Delta U > 0$ (внутренняя энергия увеличивается) $\Delta V = 0; A' = 0$ ( $A = 0$ ) (работа не совершается) $Q > 0$ (тепло поглощается)	$\Delta U = Q$ Газ увеличивает свою внутреннюю энергию за счет теплоты, полученной из внешней среды
изохорное охлаждение		$\Delta T < 0; \Delta U < 0$ (внутренняя энергия уменьшается) $\Delta V = 0; A' = 0$ ( $A = 0$ ) (работа не совершается) $Q < 0$ (тепло выделяется)	$-\Delta U = -Q$ Газ выделяет теплоту во внешнюю среду; при этом его внутренняя энергия уменьшается
адиабатное расширение		$\Delta T < 0; \Delta U < 0$ (внутренняя энергия уменьшается) $A' > 0$ (газ совершает работу) $Q = 0$ (нет теплообмена)	$0 = -\Delta U + A$ Газ совершает работу только за счет своей внутренней энергии (внутренняя энергия при этом уменьшается)
адиабатное сжатие		$\Delta T > 0; \Delta U > 0$ (внутренняя энергия увеличивается) $A' < 0$ ( $A > 0$ ) (над газом совершают работу) $Q = 0$ (нет теплообмена)	$\Delta U = A$ Над газом совершается работа, при этом внутренняя энергия газа увеличивается



# Изменения агрегатного состояния вещества

## ① ВЗАИМНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ



## ② ПАРООБРАЗОВАНИЕ

### 1) Парообразование

процесс, при котором вещество переходит из жидкого состояния в газообразное (проходит с поглощением энергии: энергия расходуется на разрыв межмолекулярных связей)

2)

### ПАРООБРАЗОВАНИЕ

Испарение	Кипение
 <p>парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости при любой температуре</p>	 <p>парообразование, происходящее со всего объема жидкости при определенной температуре <math>t_{\text{кип}}^{\circ}</math> (температура кипения)</p>
<p>Вылетают наиболее быстрые молекулы, <math>E_k</math> которых должна быть достаточна для преодоления притяжения других молекул. Таким образом, температура жидкости при испарении понижается</p>	<p>При кипении температура жидкости не изменяется (<math>t^{\circ}</math>) пока вся жидкость не выкипит. <math>t^{\circ}</math> зависит от:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) рода жидкости</li> <li>2) атмосферного давления (<math>P_A \downarrow \Rightarrow t_{\text{кип}}^{\circ} \downarrow</math>)</li> </ol>

### 3) Насыщенный пар



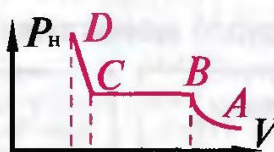
это пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью (число молекул, вылетевших из жидкости за единицу времени, равно числу возвратившихся молекул)

- концентрация насыщенного пара не зависит от его объема (при  $t^{\circ} = \text{const}$ )
- давление насыщенного пара ( $P_n$ ) зависит только от температуры



$$P = nkT$$


$P_n \uparrow$  за счет  
 $T \uparrow$  и  $n \uparrow$



AB — сжатие ненасыщенного газа:  $v \downarrow P \uparrow$   
 BC — при  $v \downarrow P_n = \text{const}$  (превращение пара в насыщенный)  
 CD — сжатие жидкости



### ③ КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

<p><b>Критическая температура</b></p> <p><math>T_k</math> [К]</p> <p>при <math>T_k</math>: <math>\rho_{пара}</math> является максимальной <math>\rho_{жидк.}</math> — минимальной</p> <p>Газ, имеющий <math>T &lt; T_k</math> ненасыщенный При <math>T &gt; T_k</math>: ни при каких давлениях газ нельзя обратить в жидкость</p>	<p>это температура, при которой исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и насыщенным паром</p>	 <p><math>\rho</math> — плотность</p>
---	---	--

### ④ ВЛАЖНОСТЬ

#### 1) Абсолютная влажность

$$P_t \text{ [Па]}; \rho_t \text{ [кг/м}^3; \text{г/м}^3]$$

парциальное давление водяного пара (при данной температуре)

плотность водяных паров в воздухе при данной температуре

#### 2) Относительная влажность

$$\varphi \text{ [%]}$$

$$\varphi = \frac{P_t}{P_{нт}} \cdot 100\%$$

$$\varphi = \frac{\rho_t}{\rho_{нт}} \cdot 100\%$$

отношение парциального давления водяного пара (плотности) при данной температуре к давлению насыщенного водяного пара  $P_{нт}$  (плотности  $\rho_{нт}$ ) при той же температуре, выраженное в процентах

#### 3) Точка росы

$$t_p$$

температура, при которой водяной пар становится насыщенным (выпадает роса)

#### 4) Приборы для определения влажности

1. Гигрометр Ламбрехта (эфирный) (для определения точки росы)

2. Гигрометр волосяной (действие основано на свойстве обезжиренного волоса менять свою длину в зависимости от влажности воздуха)

3. Психрометр (действие основано на сравнении показаний влажного и сухого термометров)

# Твердые тела

①

## Твердые тела

### Аморфные

- нет строгого порядка в расположении частиц
- **изотропия** (одинаковость физических свойств по всем направлениям)
- не имеют постоянной температуры плавления ( $t_{пл}$ )
- текучесть

### Кристаллические

- частицы расположены упорядоченно
- **анизотропия** — неодинаковость физических свойств по разным направлениям (прочности, теплопроводности и т. д.)
- строго определенная температура плавления ( $t_{пл} = const$ )
- сохранение формы

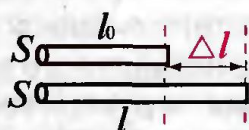
Одно и то же вещество может проявлять как аморфные, так и кристаллические свойства в различных условиях

## ② ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ

- |                        |             |
|------------------------|-------------|
| 1) растяжение (сжатие) | 3) кручение |
| 2) сдвиг (срез)        | 4) изгиб    |

## ③ ДЕФОРМАЦИЯ РАСТЯЖЕНИЯ

1)



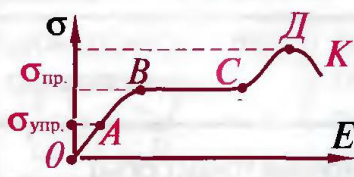
$\Delta l$  — абсолютное удлинение [м]

$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  — относительное удлинение

$\sigma = \frac{|\vec{F}_{упр}|}{S}$  — механическое напряжение [н/м<sup>2</sup> = Па]

2)

диаграмма растяжений



OA — область абсолютно упругих деформаций (выполняется закон Гука)

$\sigma_{упр}$  — предел упругости

BC — область текучести материала

$\sigma_{пр}$  — предел прочности

3)

### Закон Гука (ОПЫТНО)

для абсолютно упругих деформаций:  $\sigma \sim \epsilon \Rightarrow$

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$E$  — модуль Юнга (характеризует сопротивляемость материала деформации) [н/м<sup>2</sup> = Па]

$$F_{упр} = k|x| \Rightarrow$$

$$k = \frac{E \cdot S}{l_0}$$

механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению