

## **ЗАНЯТИЕ № 13**

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ.**

**БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. ДИФФУЗИЯ.  
СИЛЫ И ЭНЕРГИЯ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.**

**МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ  
ГАЗООБРАЗНОГО СОСТОЯНИЯ  
ВЕЩЕСТВА.**

**1. *Все вещества состоят из молекул между которыми имеются промежутки.***

**Молекулой называют наименьшую частицу вещества, способную к самостоятельному существованию и сохраняющую свойства этого вещества.**

# ПОДТВЕРЖДЕНИЯ:

косвенные	прямые
дробление веществ	фотографии отдельных больших молекул органических соединений
испарение	определение параметров молекул
расширение и сжатие тел при изменениях температуры	просачивание масла через стенки стального цилиндра при давлении 10000 атм.
деформации	
диффузия	

***2. Молекулы любого вещества непрерывно и хаотически движутся.***

**ПОДТВЕРЖДЕНИЯ:**

- броуновское движение (1827 г.)
- диффузия (зависит от температуры, агрегатного состояния и происходит до выравнивания плотности)
- определение скоростей молекул

***3. На небольших расстояниях между молекулами действуют силы притяжения и силы отталкивания, природа этих сил электромагнитная.***

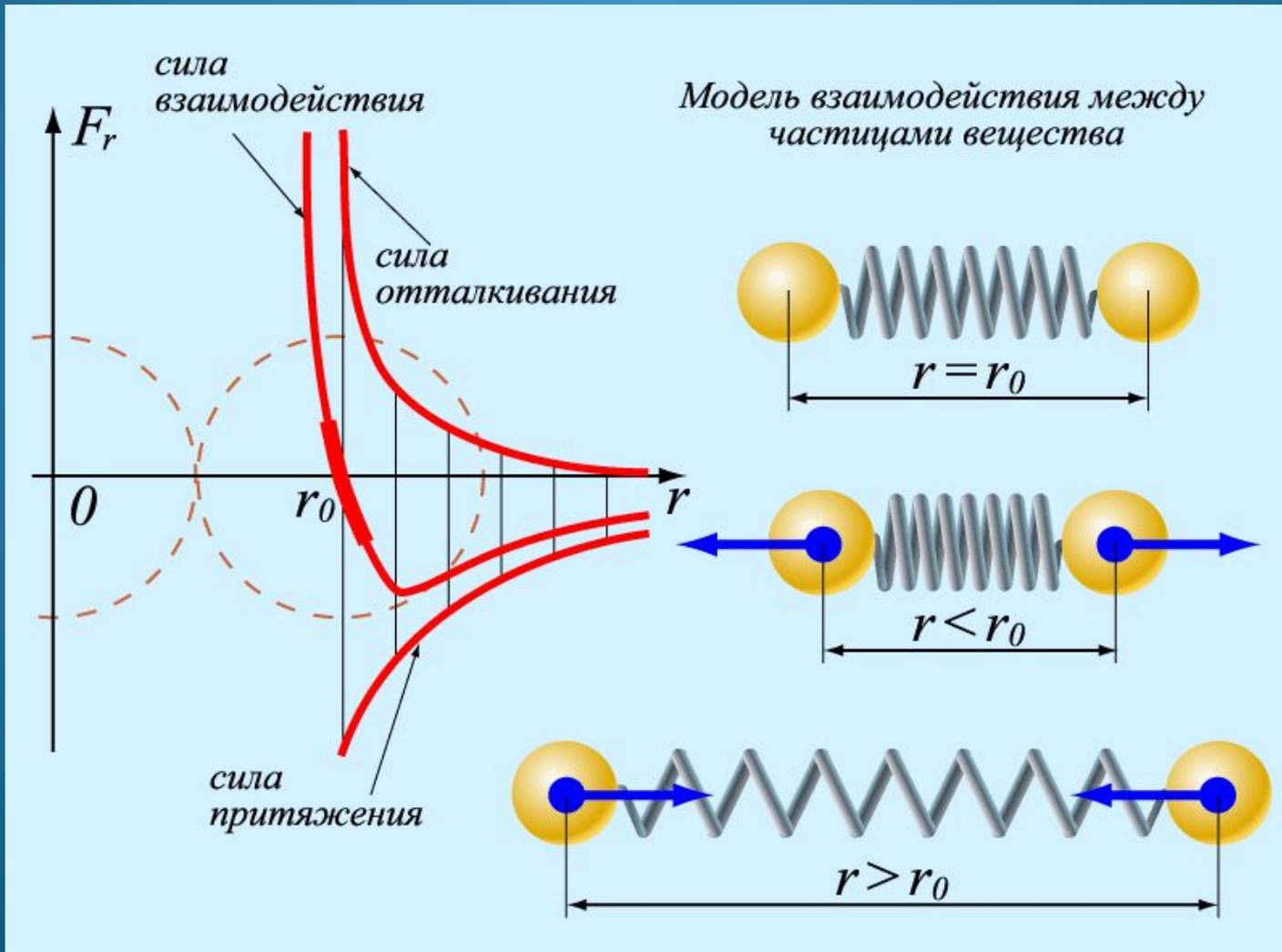
### **ПРИМЕРЫ:**

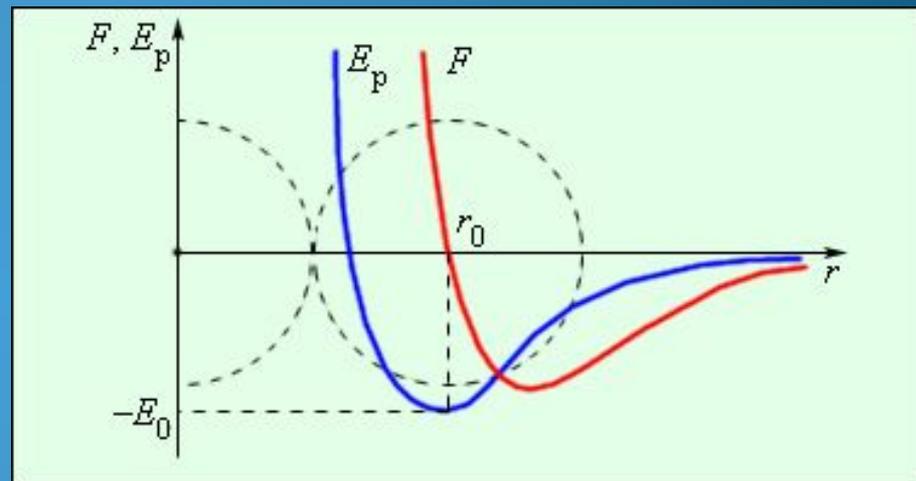
- слипание свинцовых цилиндриков**
- прилипание стекла к воде**
- сопротивление растяжению и сжатию**
- малая сжимаемость твердых тел и жидкостей**

*Радиус молекулярного действия* –  
это наименьшее расстояние между  
молекулами, на котором силы  
взаимодействия так малы, что ими  
можно пренебречь

$$(r_{\text{МОЛ}} = 10^{-9} \text{ м})$$

# СИЛЫ И ЭНЕРГИЯ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ





# АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

условия:

газообразное -  $E_k \gg E_{p\min}$

жидкое -  $E_k \sim E_{p\min}$

твердое -  $E_k \ll E_{p\min}$

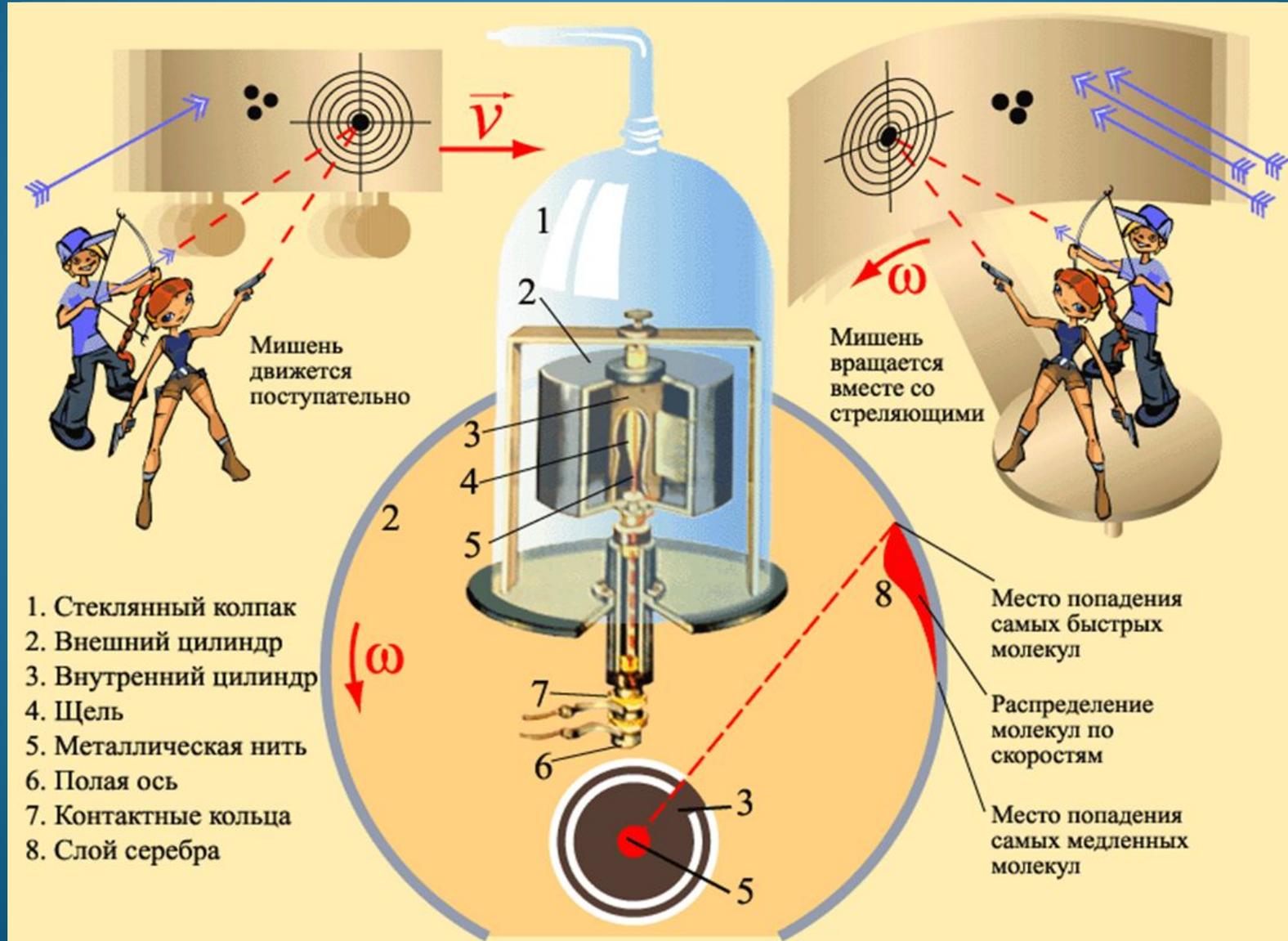
**Главную роль в поведении газа играет хаотическое движение его молекул:**

- между двумя последовательными столкновениями молекулы газа движутся равномерно и прямолинейно;**
- молекулы газа находятся на расстояниях больших радиуса молекулярного действия;**
- в каждый момент времени взаимодействует лишь незначительная часть молекул, а их взаимным притяжением можно пренебречь;**
- при столкновении молекул возникают силы отталкивания.**

## **ЗАНЯТИЕ № 14**

**СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ И ИХ  
ИЗМЕРЕНИЕ. МАССА И РАЗМЕРЫ  
МОЛЕКУЛ И АТОМОВ.  
ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА.**

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА. ОПЫТ ШТЕРНА



$$t = \frac{R-r}{v_{\text{мол}}}$$

$$t = \frac{L}{v_{\text{цил}}} = \frac{L}{\omega R}$$

$$\frac{R-r}{v_{\text{мол}}} = \frac{L}{\omega R}$$

$$v_{\text{мол}} = \frac{\omega R(R-r)}{L}$$

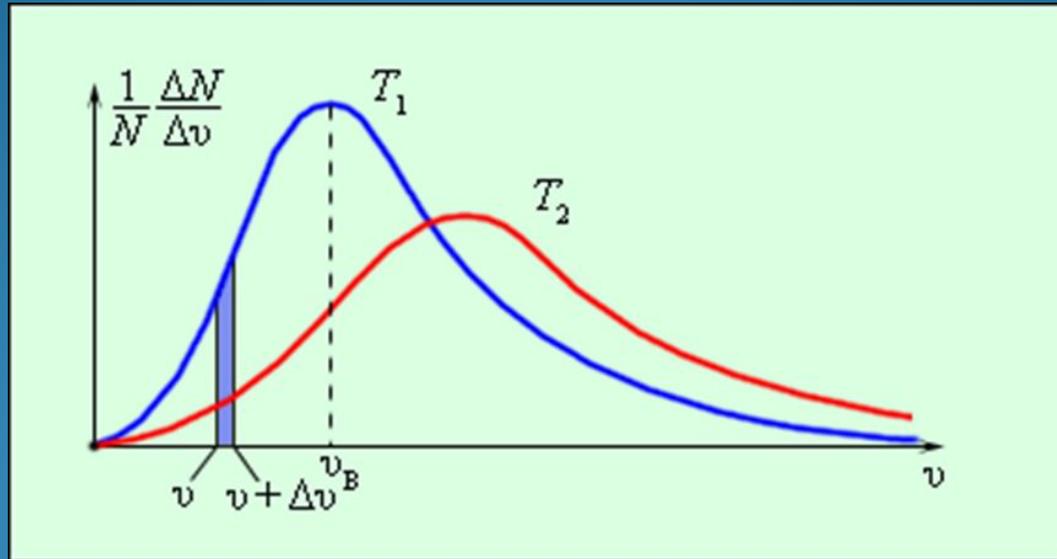
$$v_{\text{мол}} = 500 \text{ м/с}$$

При 0°C скорость молекул

- водорода 1840 м/с

- азота – 493 м/с.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ПО СКОРОСТЯМ (Кривая Максвелла) 1850 г.



$N$  - число молекул

$\frac{\Delta N}{N}$  — показывает, какую часть от общего числа молекул составляют те, скорости которых лежат в интервале  $\Delta v$

$\frac{1}{N} \frac{\Delta N}{\Delta v}$  — функция распределения молекул по скоростям

$v_B$  - наиболее вероятная скорость, соответствующая максимуму функции Максвелла.

# МАССА И РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ

Многие опыты показывают, что размер молекулы очень мал. Линейный размер молекулы или атома можно найти различными способами. Например, с помощью электронного микроскопа, получены фотографии некоторых крупных молекул, а с помощью ионного проектора (ионного микроскопа) можно не только изучить строение кристаллов, но определить расстояние между отдельными атомами в молекуле.

*Линейные размеры* простых атомов и молекул составляют около  $10^{-10}$  м.

Молекула воды во столько раз меньше крупного яблока, во сколько раз яблоко меньше земного шара.

*Массы молекул* порядка  $10^{-27}$  кг.

Массы отдельных молекул и атомов очень малы, поэтому в расчётах удобнее использовать не абсолютные значения масс, а относительные.

**Относительная молекулярная масса (или относительная атомная масса) вещества**  
 $m_{\text{отн}}$  – это отношение массы молекулы (или атома) данного вещества к  $1/12$  массы атома углерода.

$$m_{\text{отн}} = (m_0) : \left(\frac{m_{0\text{C}}}{12}\right)$$

где  $m_0$  – масса молекулы (или атома) данного вещества,  $m_{0\text{C}}$  – масса атома углерода.

**Атомная единица массы** – это  $\frac{1}{12}$  массы изотопа углерода  $\text{C}^{12}$ .

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,660 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

**Массу молекулы можно вычислить путём сложения масс элементов, которые входят в состав молекулы.**

**Например, масса молекулы воды (H<sub>2</sub>O) будет равна**

$$m_{0 \text{ H}_2\text{O}} = 2 \times m_{\text{отн H}} + m_{\text{отн O}} = 2 \times 1,00794 + 15,9994 = 18,0153 \text{ а.е.м.} = 18,0153 \times 1.66 \times 10^{-27} = 29,905 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

***Количество вещества принято считать пропорциональным числу частиц.***

Единица количества вещества – моль  
(моль).

*Модем называется количество вещества, масса которого в граммах равна его относительной молекулярной массе.*

Количество вещества  $\nu$  равно отношению числа молекул в данном теле  $N$  к числу атомов в 0,012 кг углерода, то есть количеству молекул в 1 моле вещества  $N_A$  :

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

$N_A$  – это постоянная Авогадро.

В 1 моле любого вещества содержится одинаковое количество частиц.

*Постоянная Авогадро* – это количество молекул или атомов в 1 моле вещества.

$$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

*Число Лошмидта* равно числу молекул в единице объема при нормальных условиях:

$$n_l = 2,7 \times 10^{25} \frac{\text{молекул}}{\text{м}^3}$$

*Молярная масса* – это масса вещества, взятого в количестве одного моля:

$$\mu = m_0 \times N_A$$

где  $m_0$  – масса молекулы.

Молярная масса выражается в килограммах на моль (кг/моль).

Молярная масса связана с относительной молекулярной массой соотношением:

$$\mu = 10^{-3} \times m_{\text{отн}} \left( \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right)$$

Масса любого количества вещества  $m$  равна произведению массы одной молекулы  $m_0$  на количество молекул:

$$m = m_0 N = m_0 N_A \nu = \mu \nu$$

Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе:

$$\nu = \frac{m}{\mu}$$

Массу одной молекулы вещества можно найти, если известны молярная масса и постоянная Авогадро:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{\mu}{N_A}$$

*Длина свободного пробега* – это расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями (при нормальных условиях для молекул воздуха  $10^{-7}$  м).

Длина свободного пробега обратно пропорциональна давлению газа при постоянной температуре, а с повышением температуры длина свободного пробега растет.

## ДАВЛЕНИЕ ГАЗА

Давление газа обусловлено ударами молекул

Давление численно равно силе давления  $F$ , действующей на единицу площади поверхности  $S$ :

$$P = \frac{F}{S}$$

Единица измерения давления в системе СИ:

$$1 \text{ Па (Паскаль)} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$$

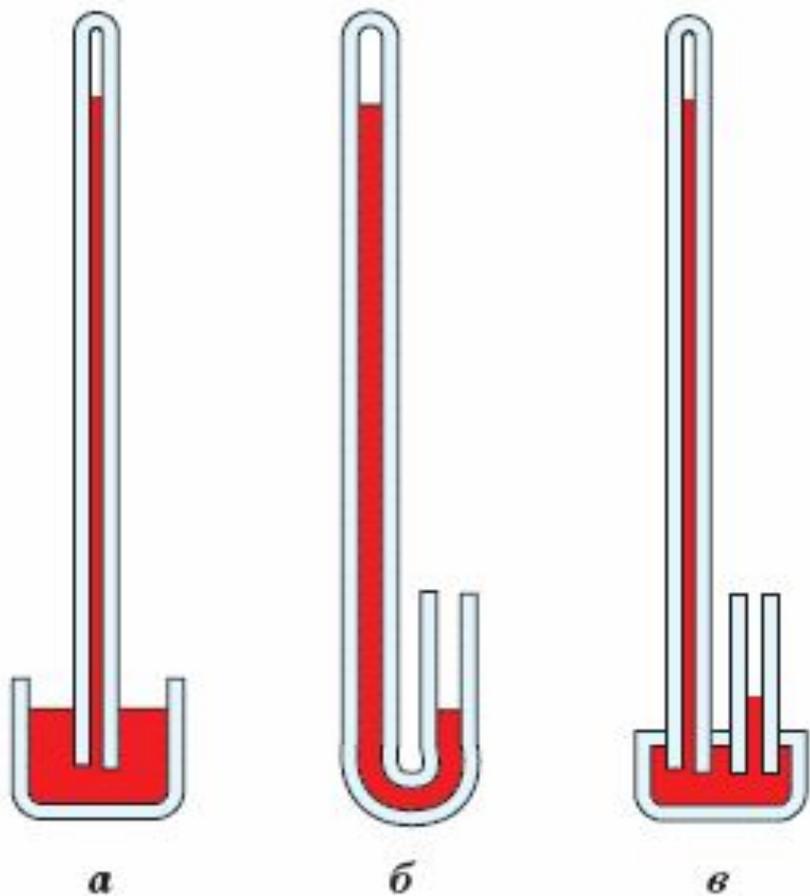
**Внесистемные единицы давления: мм.рт. ст., мм.водн.ст., бар, физическая атмосфера, техническая атмосфера.**

**$1 \text{ атм} = 1,013 \times 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$   
 $1 \text{ мм. рт. ст.} = 133 \text{ Па}$**

# **ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ (манометры, барометры)**

**Наиболее распространены жидкостные (ртутные) барометры . В ртутном барометре атмосферное давление измеряется по высоте столба ртути в запаянной сверху трубке, опущенной открытым концом в сосуд с ртутью.**

# Ртутные барометры: а – чашечный; б – сифонный; в – сифонно-чашечный

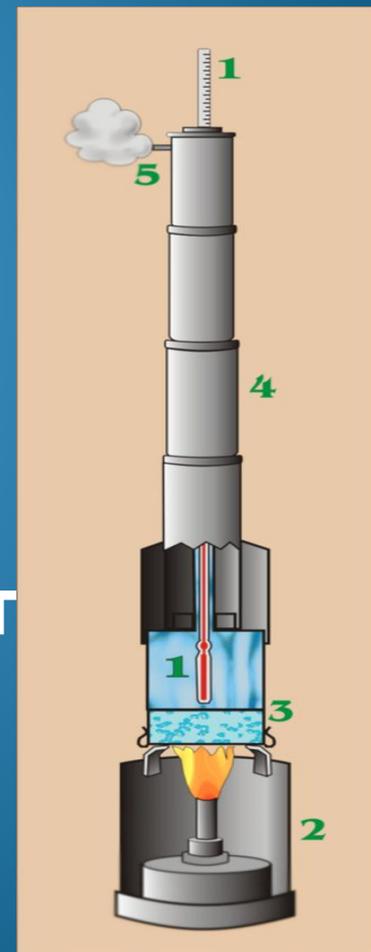


**В anerоиде атмосферное давление измеряется по величине деформации упругой металлической коробки, из которой откачан воздух; при изменениях давления коробка сжимается или расширяется, а связанная с ней стрелка перемещается по шкале, указывая давление. Anerоиды изготавливают разных типов, в т. ч. бытовые для наблюдения за изменением атмосферного давления при комнатной температуре.**

**Гипсотермометр – прибор для определения атмосферного давления по температуре кипения воды, зависящей от давления (с понижением атмосферного давления температура кипения воды понижается).**

**Гипсотермометр состоит из кипятильника и точного ртутного термометра. Термометр помещается внутри этой трубки и омывается парами кипящей воды.**

Как известно, кипение жидкости наступает, когда упругость образующегося в ней пара достигает величины внешнего давления. Когда термометр измерит температуру пара кипящей жидкости, по специальным таблицам находят соответствующую ей величину атмосферного давления.



# *ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ*

*Идеальным* называется газ, молекулы которого принимают за материальные точки, обладающие абсолютной упругостью и невзаимодействующие между собой.

Наиболее близки к идеальному - водород и гелий.

# ВАКУУМ

О пространстве, в котором давление меньше атмосферного, говорят, что в нем создан *вакуум*.

Под высоким вакуумом понимается такой вакуум, при котором длина свободного пробега определяется размерами сосуда ( $10^{-11}$  мм. рт. ст.).

При хорошем вакууме в  $1 \text{ см}^3$  воздуха находятся сотни тысяч молекул.

## 1 вариант

## 2 вариант

1. Сформулировать первое положение МКТ

1. Сформулировать второе положение МКТ

2. Дать определение молекулы

2. Дать определение радиуса молекулярного действия

3. Дать определение диффузии

3. Дать определение броуновского движения

4. Порядок размеров молекул

4. Порядок масс молекул

5. Атомная единица массы

5. Что называют молем вещества

6. Постоянная Авогадро

6. Число Лошмидта

7. Идеальный газ

7. Вакуум

8. Чем обусловлено давление газа, его единица измерения в СИ

8. Дать определение давления, записать формулу

## ЗАНЯТИЕ № 15

ТЕМПЕРАТУРА И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ.  
АБСОЛЮТНЫЙ НУЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ.  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ШКАЛА  
ТЕМПЕРАТУРЫ. СВЯЗЬ МЕЖДУ  
ДАВЛЕНИЕМ И СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ  
ЭНЕРГИЕЙ МОЛЕКУЛ ГАЗА.  
ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-  
КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ.

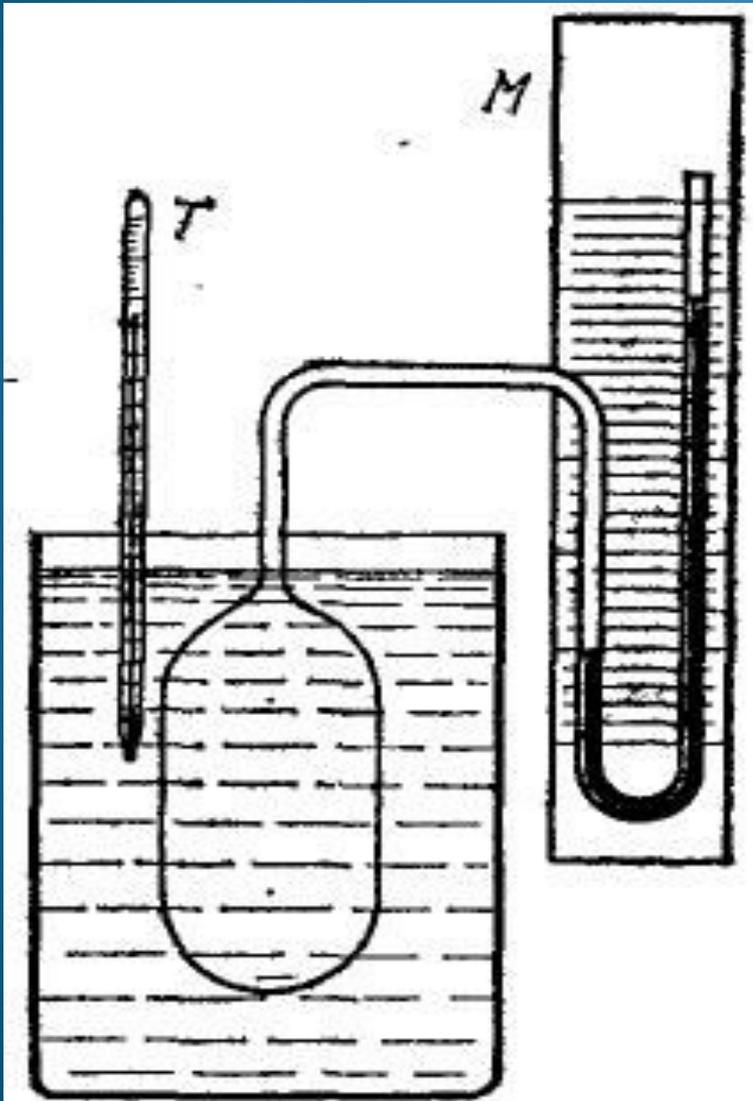
# ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа и их числу в единице объема

$$P = \frac{2}{3} n_0 \overline{E_{\text{пост}}}$$

где  $n_0 = \frac{N}{V}$ ,  $N$  - общее число молекул газа (концентрация),  $V$  – объем газа

# ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

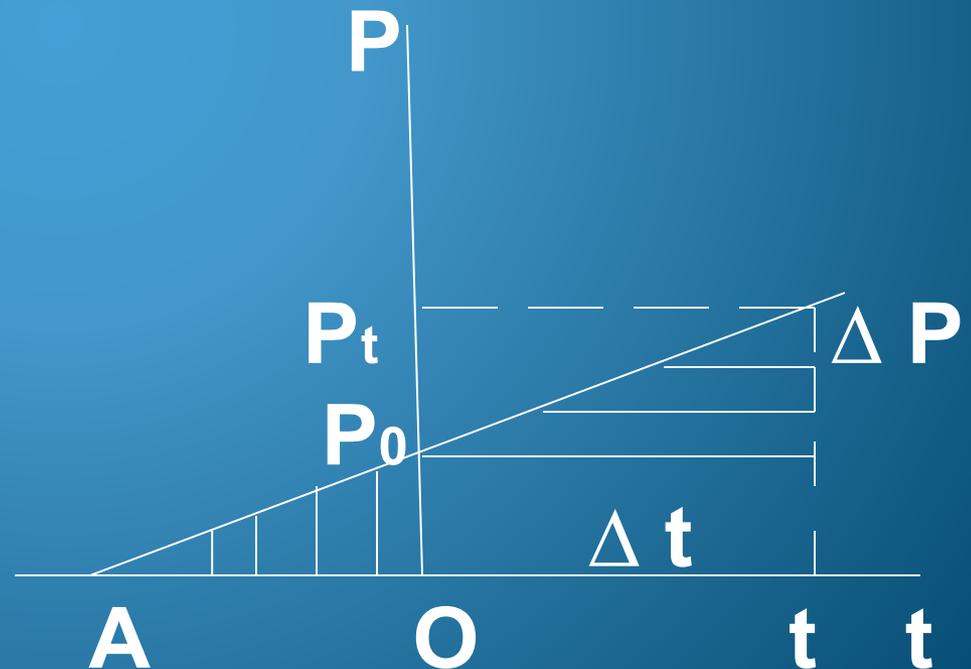


$$0^{\circ} \text{C} - P_0$$

$$t^{\circ} \text{C} - P_t$$

$$\Delta t = t - 0 = t$$

$$\Delta P = P_t - P_0$$



$$\frac{P_0}{OA} = \frac{\Delta P}{\Delta t}; \quad \frac{1}{OA} = \frac{\Delta P}{P_0 \Delta t}$$

$$\frac{1}{OA} = \gamma$$

$$\gamma = \frac{\Delta P}{P_0 \Delta t}$$

$$\gamma = \frac{1 \text{ Па}}{1 \text{ Па} \times 1 \text{ град}} = 1 \text{ град}^{-1}$$

*$\gamma$  - температурный коэффициент  
давления*

*Температурный коэффициент давления* показывает на какую часть давления газа взятого при 0 градусах Цельсия изменяется его давление при нагревании на 1 градус.

Температурный коэффициент давления не зависит от рода газа и равен

$$\gamma = \frac{1}{273} \text{ град}^{-1}$$

$$\gamma = \frac{\Delta P}{P_0 \Delta t}$$

$$\Delta P = \gamma P_0 \Delta t$$

$$P_t - P_0 = \gamma P_0 t$$

$$P_t = P_0 (1 + \gamma t) \text{ - закон Шарля}$$

## АБСОЛЮТНЫЙ НУЛЬ

Температура, при которой прекращается поступательное движение молекул называется *абсолютным нулем*.

$$P_t = P_0 (1 + \gamma t)$$

$$0 = P_0 (1 + \gamma t)$$

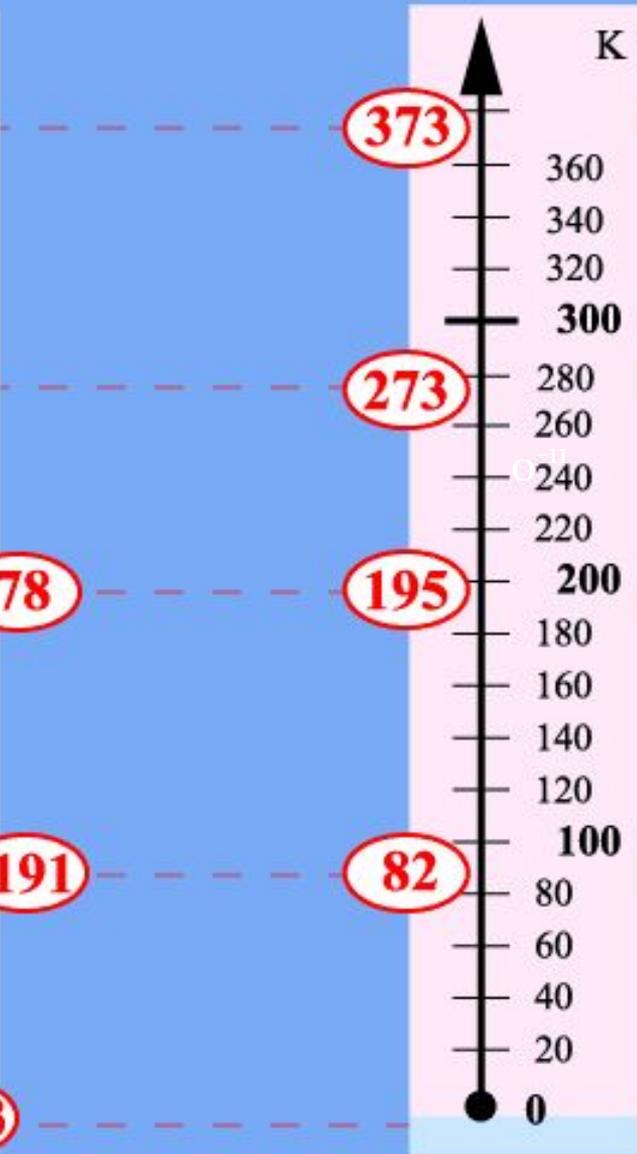
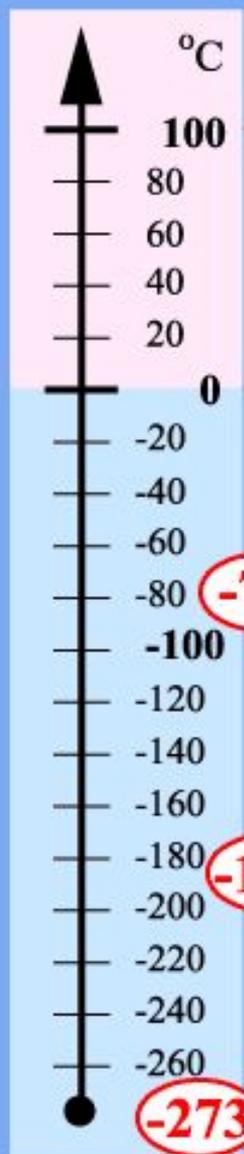
$$1 + \gamma t = 0; \quad t = -\frac{1}{\gamma} = -273^\circ \text{C}$$

# Шкала Цельсия

# Термодинамическая шкала

$$t = T - 273$$

$$T = t + 273$$



*кипение воды*



*плавление льда*



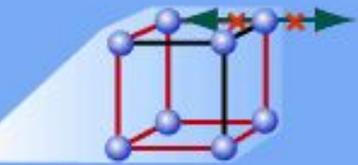
*сухой лед (CO<sub>2</sub>)*



*жидкий воздух*

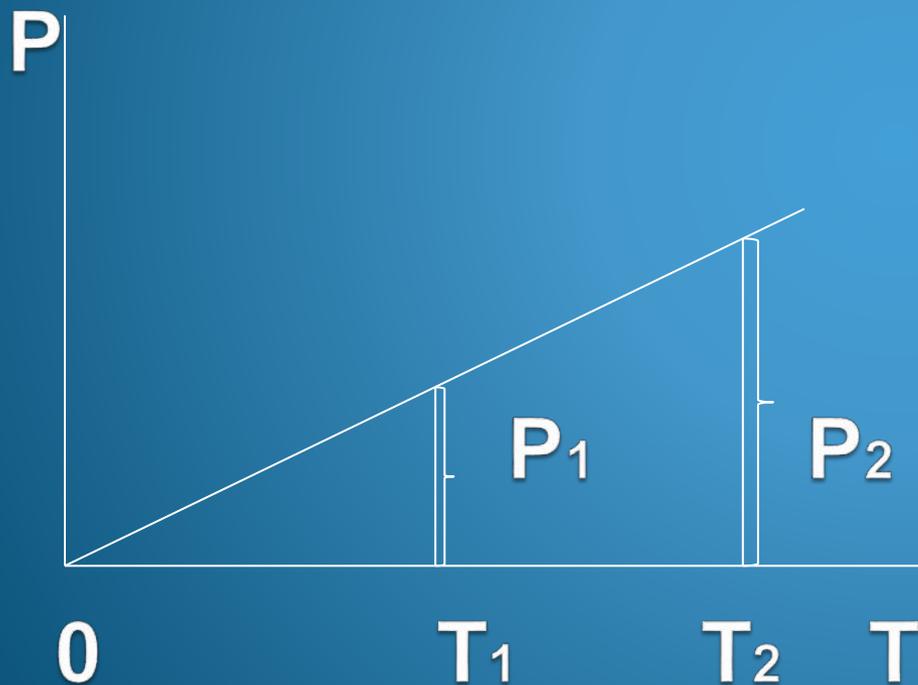


*абсолютный ноль*



# ЗАКОН ШАРЛЯ ЧЕРЕЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$



Давление газа  
прямо  
пропорционально  
абсолютной  
температуре

# ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ОТ АБСОЛЮТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

$$P \sim T$$

$$P \sim \overline{E_{\text{пост}}}$$

значит

$$\overline{E_{\text{пост}}} \sim T$$

$$\overline{E_{\text{пост}}} = \frac{3}{2} kT$$

$$P = \frac{2}{3} n_0 \overline{E_{\text{пост}}} = \frac{2}{3} n_0 \frac{3}{2} kT = n_0 kT$$

$$P = n_0 k T$$

– это основное уравнение м.к.т.

где

*k* - постоянная Больцмана

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Давление газа не зависит от его природы, а определяется только концентрацией молекул и его абсолютной температурой.

1. Перевести в Кельвины:

$10^{\circ}\text{C}$ ,  $27^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-273^{\circ}\text{C}$

2. Выразить температуры по шкале

Цельсия:

4К, 313К, 250К

3. У какого из газов (водорода, гелия или кислорода) средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекул при одинаковых температурах больше?

4. Как изменится давление газа, если при постоянной температуре и объеме число молекул увеличить в два раза?

5. Как изменится давление газа, если часть молекул газа заменить таким же числом молекул с меньшей молекулярной массой?

6. Как изменится давление данной массы газа при постоянном объеме, если термодинамическую температуру газа увеличить в 2 раза и каждая молекула при этом распадется на два атома?

## **ЗАНЯТИЕ № 16**

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ  
ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА.  
МОЛЯРНАЯ ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ.  
ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ**

$$P = n_0 k T, \quad n_0 = \frac{N}{V},$$

где  $N$  – общее число молекул газа,  $V$  – объем

$$P = \left(\frac{N}{V}\right) k T \quad \text{или} \quad \frac{PV}{T} = Nk$$

если  $m = \text{const}$ ,  $N = \text{const}$ , то

$\frac{PV}{T} = \text{const}$  - это объединенный газовый закон

ПРИВЕДЕНИЕ ОБЪЕМА ГАЗА К НОРМАЛЬНЫМ  
УСЛОВИЯМ

$$T_0 = 273 \text{ К}, \quad P_0 = 1,013 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}$$

$$V_0 = \frac{PVT_0}{TP_0}$$

# МОЛЯРНАЯ ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ

$$\frac{pV}{T} = N k$$

Для 1 моля:  $\frac{pV_{\mu}}{T} = N_A k$

$N_A k = R$  – универсальная газовая  
постоянная

$$\frac{pV_{\mu}}{T} = R$$

$$R = \frac{22,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль} \times 1,013 \times 10^5 \text{ Па}}{273 \text{ К}} = 8,31 \frac{\text{Н} \times \text{м}}{\text{моль} \times \text{К}}$$

$$R = 6,02 \times 10^{23} \times 1,38 \times 10^{-23} = 8,31 \frac{\text{Н} \times \text{м}}{\text{моль} \times \text{К}}$$

# УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА-МЕНДЕЛЕЕВА

$$\frac{PV}{T} = N k$$

$$N = N_A \nu$$

где  $\nu$  – число молей

$$\frac{PV}{T} = N_A \nu k$$

$$\nu = \frac{m}{\mu}$$

$$N_A k = R$$

$$\frac{PV}{T} = \left(\frac{m}{\mu}\right) R \quad \text{или}$$

$$PV = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T \quad \text{– уравнение Клапейрона-Менделеева}$$

# ИЗОХОРИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

$$V = \text{const}, m = \text{const}$$

$$\frac{P_1 V}{T_1} = \frac{P_2 V}{T_2}$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} - \text{закон Шарля}$$

$$P_1 V = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T_1$$

$$P_2 V = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} - \text{закон Шарля}$$



$$V_1 < V_2 < V_3$$

# ИЗОБАРИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

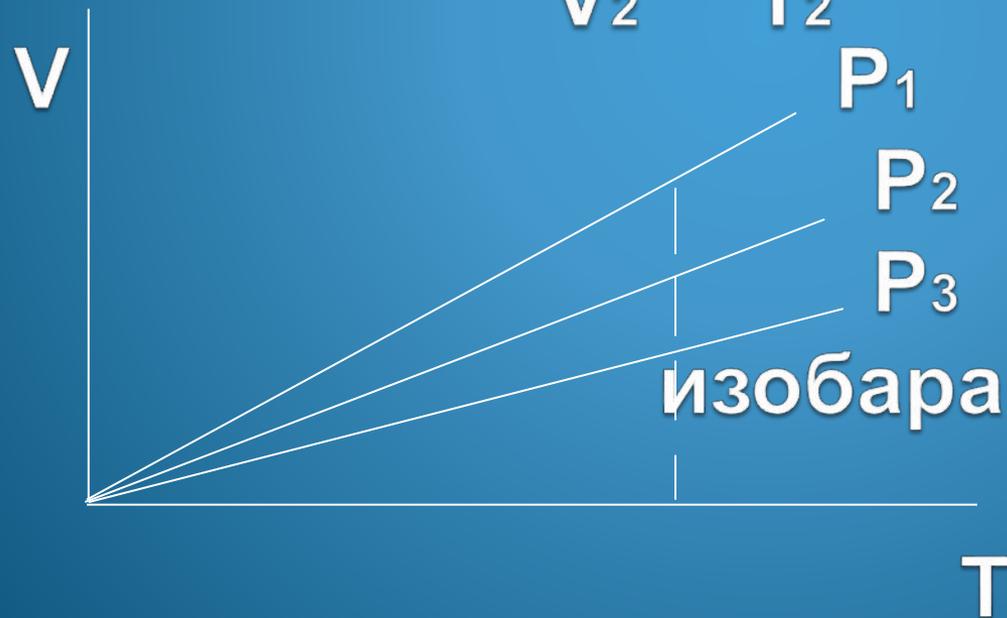
$$P = \text{const}, m = \text{const}$$

$$\frac{PV_1}{T_1} = \frac{PV_2}{T_2}$$

$$PV_1 = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T_1$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} - \text{закон Гей-Люссака}$$
$$PV_2 = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} - \text{закон Гей-Люссака}$$



$$P_1 < P_2 < P_3$$

$$V_t = V_0(1 + \beta t)$$

$\beta$  – температурный коэф. объемного расширения

Температурный коэффициент объемного расширения показывает на какую часть объема газа, взятого при нуле градусах Цельсия, изменяется его объем при нагревании на 1 градус.

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t}$$

$$\beta = \frac{1 \text{ м}^3}{1 \text{ м}^3 \times 1 \text{ град}} = 1 \text{ град}^{-1}$$

Температурный коэффициент объемного расширения не зависит от рода газа и равен

$$\beta = \frac{1}{273} \text{ град}^{-1}$$

# ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

$$T = \text{const}, m = \text{const}$$

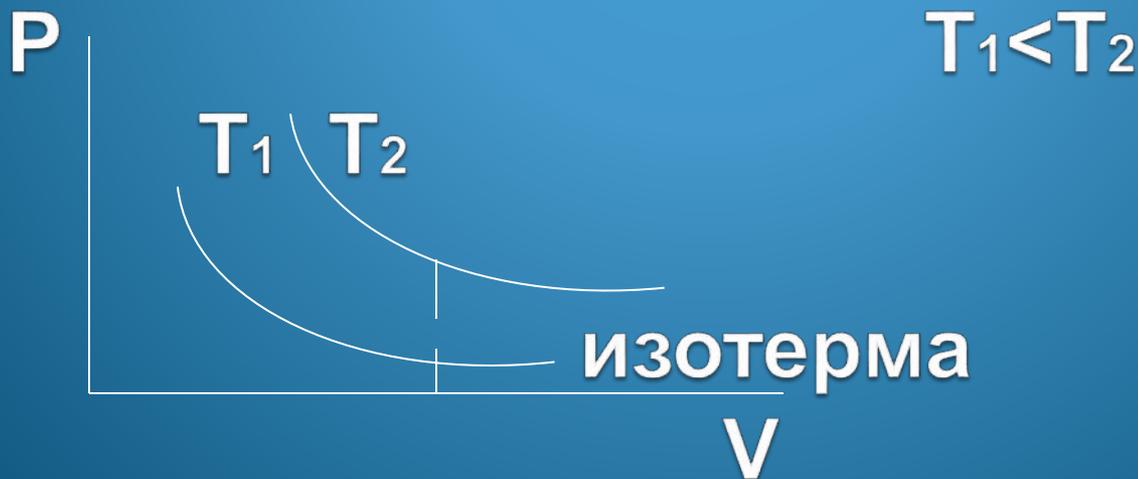
$$\frac{P_1 V_1}{T} = \frac{P_2 V_2}{T}$$

$$P_1 V_1 = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T$$

$$P_2 V_2 = \left(\frac{m}{\mu}\right) R T$$

$P_1 V_1 = P_2 V_2$  -закон Бойля-Мариотта

$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$  -закон Бойля-Мариотта



## **ЗАНЯТИЕ № 18**

**ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ГАЗА.  
РАБОТА И ТЕПЛОТА КАК ФОРМА  
ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ.  
УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ.  
УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА.**

***Термодинамика*** – это наука о тепловых явлениях. В противоположность молекулярно-кинетической теории, которая делает выводы на основе представлений о молекулярном строении вещества, термодинамика исходит из наиболее общих закономерностей тепловых процессов и свойств макроскопических систем.

Одним из важнейших понятий термодинамики является *внутренняя энергия* тела. Все макроскопические тела обладают энергией, заключенной внутри самих тел. С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия вещества складывается из кинетической энергии всех атомов и молекул и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом.

# ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

*Внутренняя энергия идеального газа* равна сумме кинетических энергий всех частиц газа, находящихся в непрерывном и беспорядочном тепловом движении (энергией взаимодействия частиц идеального газа можно пренебречь).

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры и не зависит от объема.

***Число степеней свободы* — это число независимых переменных, полностью определяющих положение молекулы как системы атомов в пространстве.**

Газ		одноатомный	двухатомный	трехатомный
Число степеней свободы	поступательных	3	3	3
	вращательных	-	2	3
	всего	3	5	6

На каждую степень свободы молекулы приходится в среднем одинаковая энергия

$$E_i = \left(\frac{1}{2}\right) kT,$$

где

$k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана,  
Т — абсолютная температура газа.

Таким образом, средняя кинетическая энергия одной молекулы газа

$$E = \left(\frac{i}{2}\right) kT,$$

где

$i$  — число степеней свободы молекулы.

Внутренняя энергия газа, содержащего  $N$  частиц, количеством молей  $\nu$  и массой  $m$  :

$$\begin{aligned} U &= N \left(\frac{i}{2}\right) k T = \nu N_A \left(\frac{i}{2}\right) k T = \left(\frac{i}{2}\right) \nu N_A k T = \\ &= \left(\frac{i}{2}\right) \left(\frac{m}{\mu}\right) N_A k T = \left(\frac{i}{2}\right) \left(\frac{m}{\mu}\right) RT = \left(\frac{i}{2}\right) PV \end{aligned}$$

Внутренняя энергия

- одноатомного газа  $U_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{m}{\mu}\right) RT$

- двухатомного газа  $U_2 = \frac{5}{2} \left(\frac{m}{\mu}\right) RT$

- трех (много) атомного газа  $U_3 = 3 \left(\frac{m}{\mu}\right) RT$

Существуют способы изменения внутренней энергии тела: *совершение работы и теплопередача.*

При совершении работы она меняется в двух случаях: при *трении* и при *неупругой деформации*. При совершении работы силой трения внутренняя энергия увеличивается за счёт уменьшения механической энергии, трущиеся тела нагреваются. В случае неупругого сжатия тела его внутренняя энергия увеличивается за счёт уменьшения механической энергии.

**Внутреннюю энергию тела можно увеличить, совершая над телом работу. Если же работу выполняет само тело, его внутренняя энергия уменьшается.**

***Теплопередача – процесс изменения внутренней энергии без совершения работы, при этом внутренняя энергия одного тела увеличивается за счёт уменьшения внутренней энергии другого тела. Переход энергии идет от тел с более высокой температурой к телам с более низкой температурой. Существуют ее варианты: *теплопроводность, конвекция и излучение.****

**Внутренняя энергия не постоянная величина. Она может изменяться. Если повысить температуру тела, то его внутренняя энергия увеличится (увеличивается средняя скорость движения молекул). При понижении температуры, внутренняя энергия тела уменьшается.**

**Обмен внутренней энергией между телами и окружающей средой или между частями тела без совершения механической работы называется *теплообменом*.**

Мерой изменения внутренней энергии тела является *количество теплоты*.

$$Q = \Delta U$$

$$\Delta U = cm\Delta T, \text{ или } Q = cm\Delta T,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость вещества,

$m$  – масса вещества,

$\Delta T$  – изменение температуры тела.

При нагревании тела  $\Delta T = T_2 - T_1$

При охлаждении тела  $\Delta T = T_1 - T_2$

*Удельная теплоемкость* – это физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо передать единице массы данного вещества для того, чтобы увеличить его температуру на единицу. Формула расчёта удельной теплоёмкости:

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

$$[c] = \left[ 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}} \right]$$

$$c_{\text{своды}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}}$$

**Теплоемкость** – это количество теплоты, необходимое для нагревания вещества на 1 К.

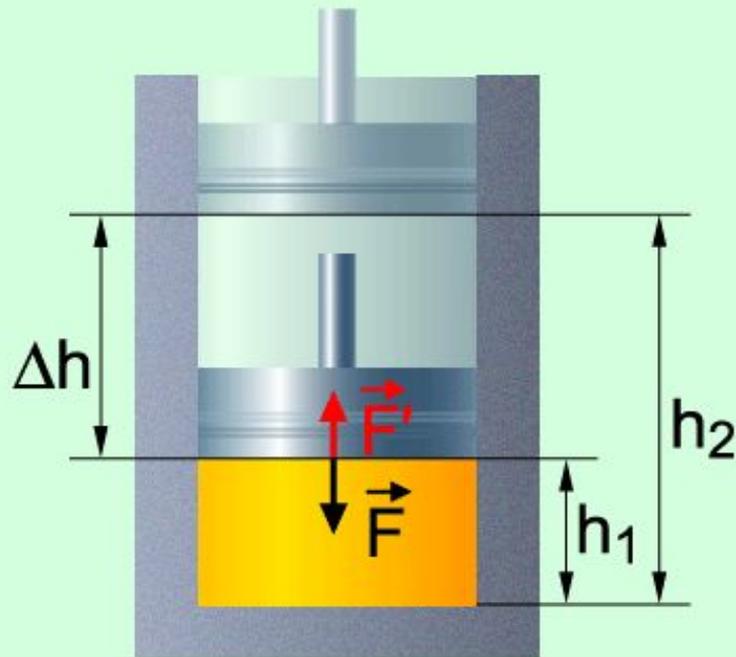
$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$
$$[C] = \left[1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right]$$

**УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА**

$$\sum Q_{\text{отд}} = \sum Q_{\text{пол}}$$

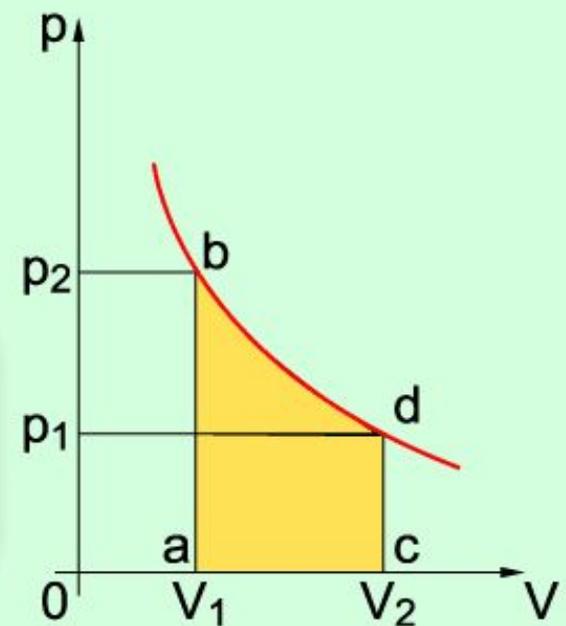
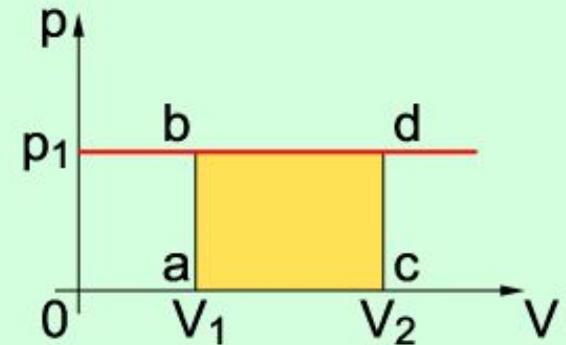
Теплообмен происходит до выравнивания температур тел. Температуру, установившуюся при теплообмене обозначают  $\Theta$ .

# РАБОТА ГАЗА ПРИ ИЗОБАРИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ОБЪЕМА



$$A' = F' \Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(S h_2 - S h_1)$$

$$A' = p(V_2 - V_1) = p \Delta V$$



# ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ МОЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

$$A_{\text{моль}} = P \Delta V_{\text{моль}}$$

$$P V_{\text{моль}2} = R T_2; \quad P V_{\text{моль}1} = R T_1$$

$$P (V_{\text{моль}2} - V_{\text{моль}1}) = R (T_2 - T_1)$$

$$P \Delta V_{\text{моль}} = R \Delta T$$

$$R = \frac{P \Delta V_{\text{моль}}}{\Delta T} = \frac{A_{\text{моль}}}{\Delta T}$$

Молярная газовая постоянная численно равна работе, совершаемой одним молем идеального газа, при его изобарическом расширении при нагревании на 1К.

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \times \text{К}}$$

## ЗАНЯТИЕ № 19

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ.  
АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС.  
ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ.  
ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ  
МАШИНЫ. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ.  
КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ.  
ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ.  
ОХРАНА ПРИРОДЫ.

## ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Подведенное к системе количество теплоты частично идет на увеличение внутренней энергии системы, а частично на совершение этой системой работы.

$$Q = \Delta U + A$$

*Изохорический процесс*

$$A = P \Delta V, \text{ т.к. } \Delta V = 0, \text{ то } A = 0$$

$$Q = \Delta U$$

## Изобарический процесс

$A = P \Delta V$ , т.к.  $\Delta V$  не равно нулю, то  $A$  совершается

$$\Delta U = \frac{i}{2} \left( \frac{m}{\mu} \right) R \Delta T,$$

$$Q = \Delta U + A$$

## Изотермический процесс

$$T = \text{const}, \Delta U = 0,$$

$$Q = A$$

## АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Процесс в какой либо системе, который происходит без теплообмена с окружающей средой, называется адиабатическим.

$$0 = \Delta U + A$$

$$A = -\Delta U$$



Адиабата идет круче, чем изотерма, т.к. кроме изменения температуры меняется и концентрация молекул ( $P=n_0kT$ ).

## **ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ**

**1. Кельвин: Не возможны такие процессы, единственным конечным результатом которых явилось бы отнятие от некоторого тела определенного количества теплоты и превращение этого тепла полностью в работу.**

**2. Невозможен такой периодически действующий двигатель, который получал бы тепло от одного резервуара и превращал это тепло полностью в работу.**

## ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

Из первого начала термодинамики вытекает невозможность создания вечного двигателя т.е. устройства, способного совершать неограниченное количество работы без затрат топлива или других материалов.

*Тепловой машиной* или тепловым двигателем называется машина, в которой происходит превращение энергии сжигаемого топлива в механическую энергию.

**Если после изменений состояния тело приходит снова в свое первоначальное состояние, то это изменение состояния называют замкнутым процессом или циклом.**

**Всякая тепловая машина содержит:  
рабочее тело, нагреватель и  
холодильник.**

**Рабочее тело за счет полученной от нагревателя энергии от сгорания топлива совершает работу и отдает холодильнику количество теплоты  $Q_2 = Q_1 - A$ .**

**В используемых на практике двигателях совершивший работу газ или пар выпускают из двигателя и следующий рабочий цикл начинают с новой порцией газа.**

***У паровой турбины или машины* нагревателем является паровой котел, а холодильником атмосфера или устройство для охлаждения и конденсации отработанного пара.**

*В двигателях внутреннего сгорания* повышение температуры происходит в результате сгорания топлива внутри двигателя и нагревателем являются раскаленные продукты сгорания топлива, холодильник – атмосфера.

Паровая машина и двигатель внутреннего сгорания – это тепловые машины, работающие по прямому циклу т.к. рабочее тело производит работу.

# СХЕМА ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ПРЯМОМУ ЦИКЛУ

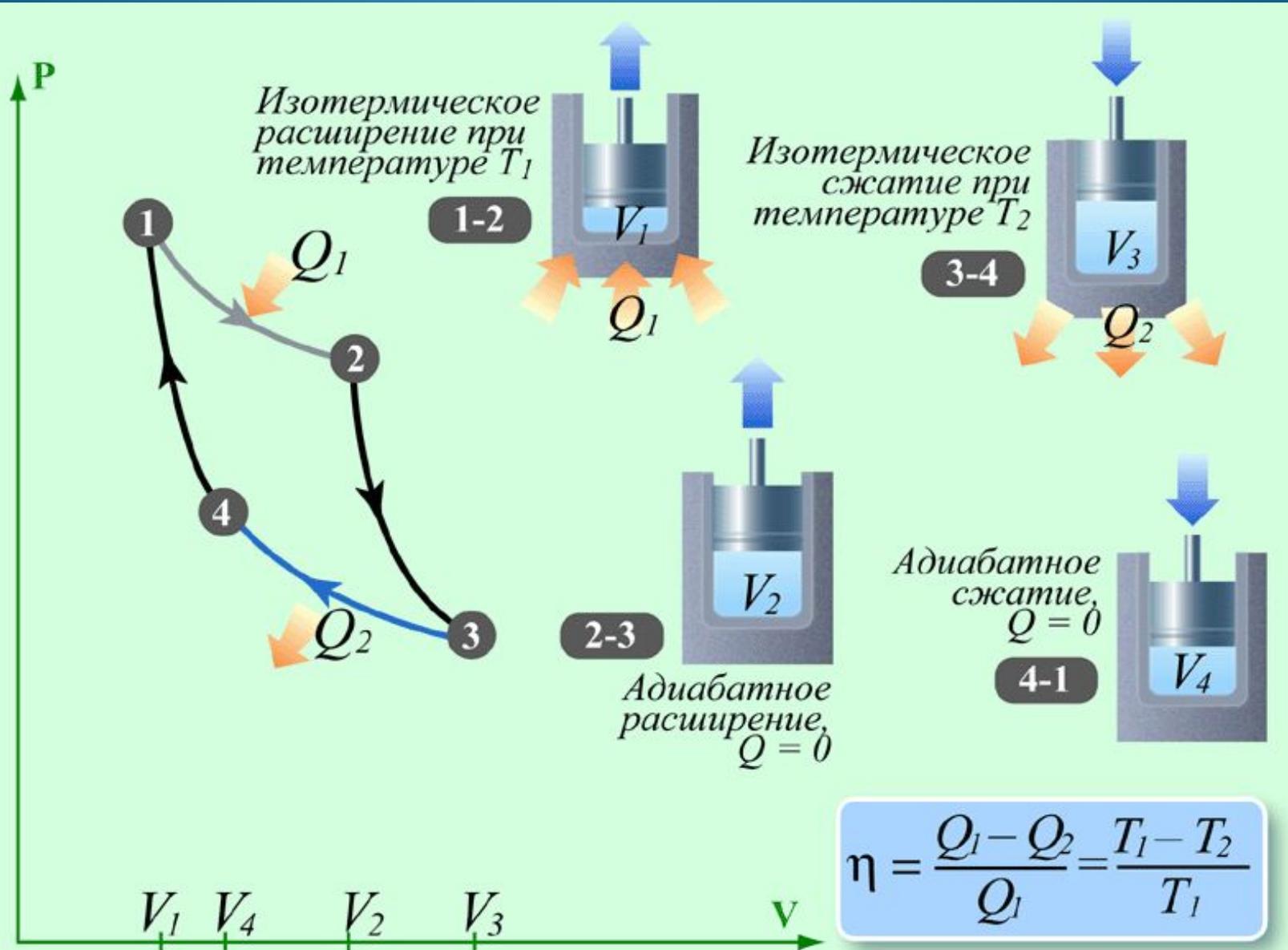


Отношение энергии полезной, ко всей энергии, полученной при сгорании топлива, называют коэффициентом полезного действия тепловой машины.

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

Теоретически КПД тепловых машин около 66%, на практике 40-44%.

# ЦИКЛ КАРНО (1824 г.)



$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Если для совершения работы рабочему телу в процессе работы передается - энергия процесс обратный.

По обратному циклу работает холодильник.

Холодильный коэффициент:

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

# СХЕМА ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ОБРАТНОМУ ЦИКЛУ



1. Нагреется или охладится воздух в комнате, если вы забыли закрыть дверцу холодильника.

2. Газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в  $n$  раз выше абсолютной температуры охладителя. Какую долю теплоты, получаемой за один цикл от нагревателя, газ отдает охладителю?

## **ЗАНЯТИЕ № 20**

**ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ.  
НАСЫЩЕННЫЕ И НЕНАСЫЩЕННЫЕ  
ПАРЫ. АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ  
ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. ТОЧКА РОСЫ.**

## ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

Переход вещества из жидкого состояния в газообразное называется *парообразованием*, а переход вещества из газообразного состояния в жидкое – *конденсацией*.

Парообразование может происходить в виде *испарения и кипения*.

*Испарением* называют парообразование, которое происходит только со свободной поверхности жидкости, граничащей с газообразной средой или вакуумом.

На поверхности жидкости всегда происходит два процесса: испарение и конденсация, если преобладает испарение – жидкость охлаждается, а если конденсация – жидкость нагревается.

*Скорость испарения* зависит

- от природы жидкости,
- от площади поверхности жидкости,
- от температуры жидкости,
- от плотности молекул пара над поверхностью жидкости.

Для превращения жидкости в пар к ней подводят теплоту.

Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при неизменной температуре, называется теплотой парообразования

$$Q_{\text{п}} = r m$$

$r$  – удельная теплота парообразования

$$[r] = \left[ \frac{Q_{\text{п}}}{m} \right] = \left[ 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

# ПАРЫ НАСЫЩАЮЩИЕ И НЕНАСЫЩАЮЩИЕ ПРОСТРАНСТВО И ИХ СВОЙСТВА

Пар, находящийся в состоянии подвижного равновесия со своей жидкостью (число испаряющихся молекул равно числу конденсирующихся), называется паром *насыщающим* пространство.

Если испарение преобладает над конденсацией, или пар находится без жидкости, он называется *ненасыщенным*.

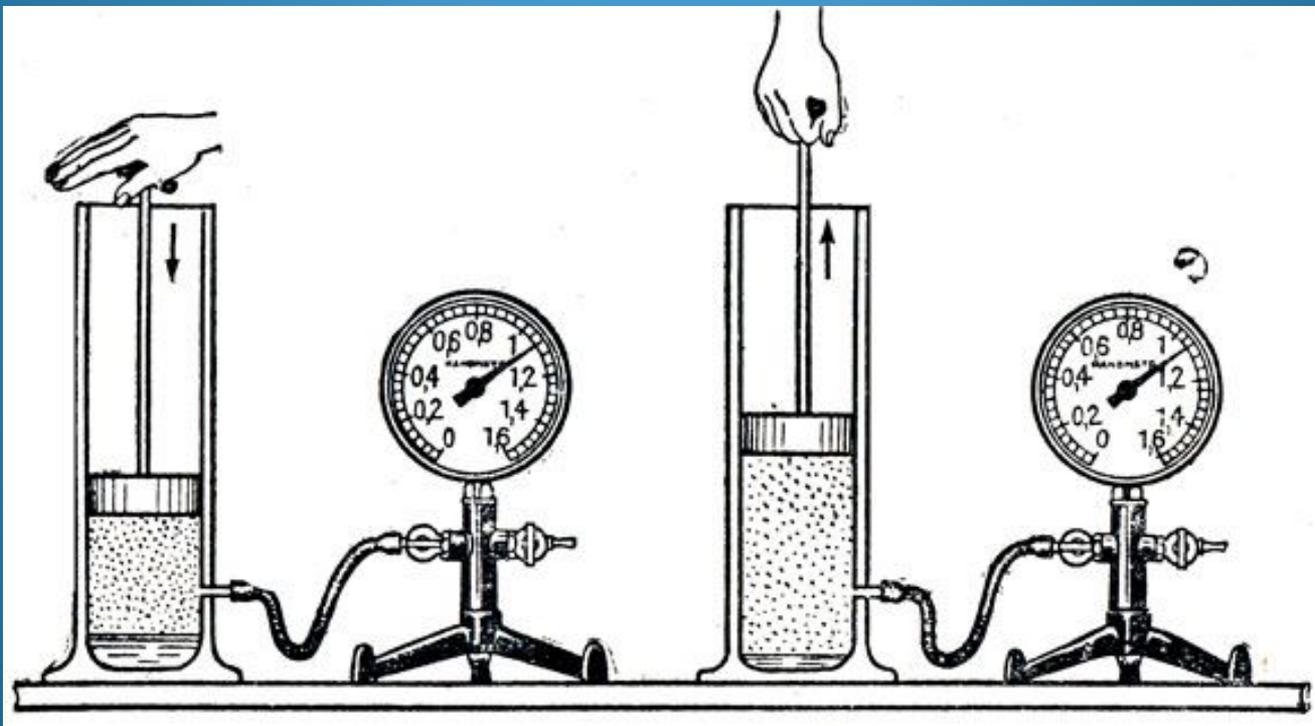
# 1. Изохорический процесс



При изохорическом процессе давление насыщенного пара зависит от его рода и быстро растет при повышении температуры в связи с увеличением средней кинетической энергии поступательного движения молекул пара и увеличением числа молекул пара в единице объема за счет испарения ( $P = n_0 kT$ ). Давление насыщенного пара однозначно определяется его температурой.

## 2. Изотермический процесс

При постоянной температуре давление насыщенного пар не зависит от объема (так как меняется масса насыщенного пара).



Законы идеальных газов к насыщенным парам не применимы.

## ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

*Абсолютная влажность воздуха*

определяется плотностью водяного пара

$\rho_a = \frac{m_p}{V}$  или его давлением  $P_a$ .

*Относительная влажность воздуха*

показывает сколько процентов

составляет абсолютная влажность от

плотности водяного пара  $\rho_n$  или его

давления  $P_n$ , насыщающего воздух при

имеющейся у него температуре.

$$B = \left(\frac{\rho_a}{\rho_n}\right) 100\%; \quad B = \left(\frac{P_a}{P_n}\right) 100\%$$

Относительная влажность определяется не только абсолютной влажностью, но и температурой.

Пример:

$$\rho_a = 0,0094 \text{ кг/м}^3$$

$$t_1 = 22^\circ\text{C}, \rho_{н1} = 0,0194 \text{ кг/м}^3$$

$$B = \left( \frac{0,0094 \text{ кг/м}^3}{0,0194 \text{ кг/м}^3} \right) \times 100\% = 50\%$$

Т.к.  $\rho_a = \text{const}$ , то при

$$t_2 = 10^\circ\text{C}, \rho_{н2} = 0,0094 \text{ кг/м}^3$$

$$B = \left( \frac{0,0094 \text{ кг/м}^3}{0,0094 \text{ кг/м}^3} \right) \times 100\% = 100\%$$

Воздух будет насыщен водяными парами.

Если воздух охладится до  $t_3 = 6^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho_{н3} = 0,0073 \text{ кг/м}^3$ , то из каждого  $1 \text{ м}^3$  сконденсируется (выпадет роса)

$$m_p = (\rho_{н2} - \rho_{н3}) \times V = (0,0094 \text{ кг/м}^3 - 0,0073 \text{ кг/м}^3) \times 1 \text{ м}^3 = 0,0021 \text{ кг}$$

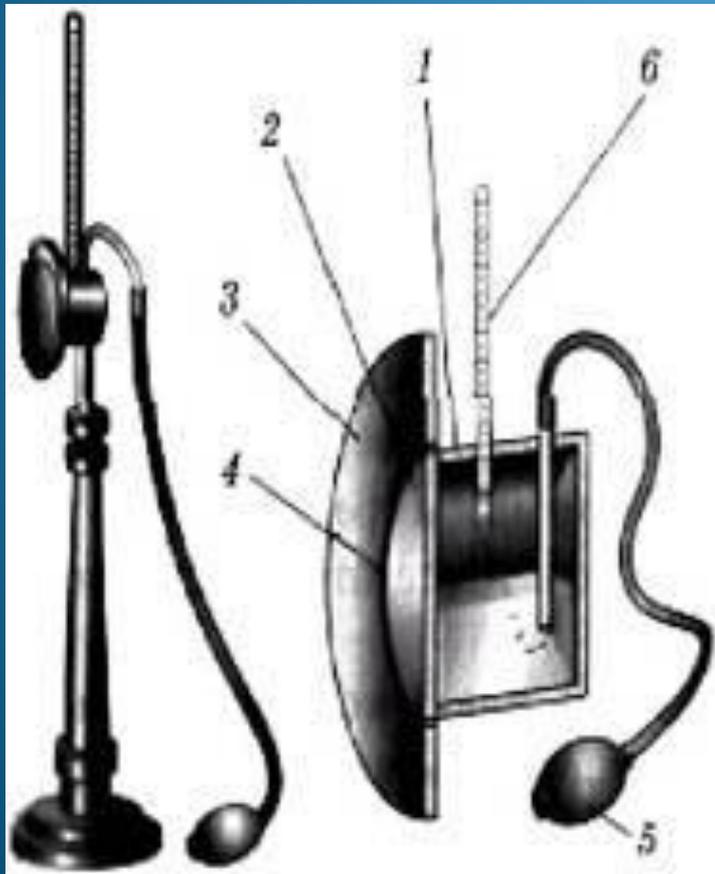
Температура, при которой воздух в процессе своего охлаждения становится насыщенным водяными парами, называется *точкой росы*.

В примере точка росы  $t_p = 10^{\circ}\text{C}$ , при точке росы:  $\rho_a = \rho_n(t_p)$

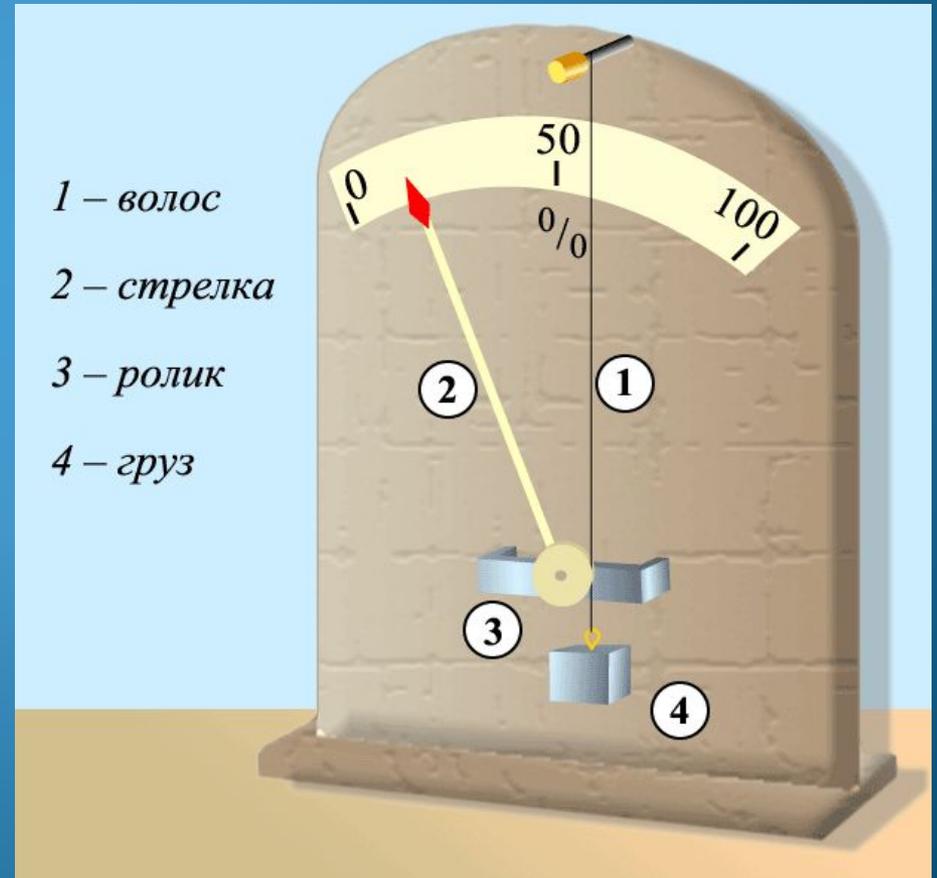
1. Чем объясняется, что вечером после жаркого дня в низменной местности наблюдается образование тумана?
2. Когда образуется иней?

# ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

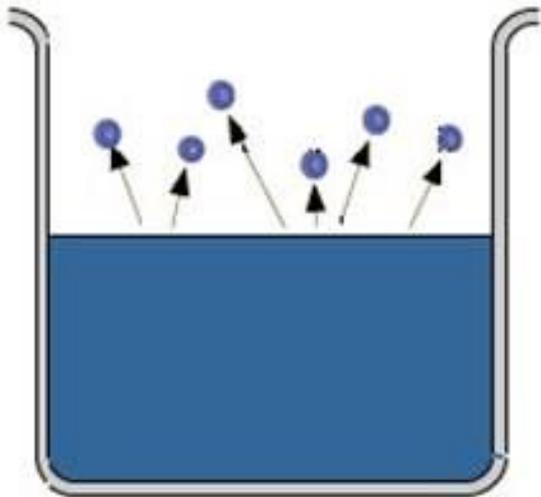
Конденсационный  
гигрометр



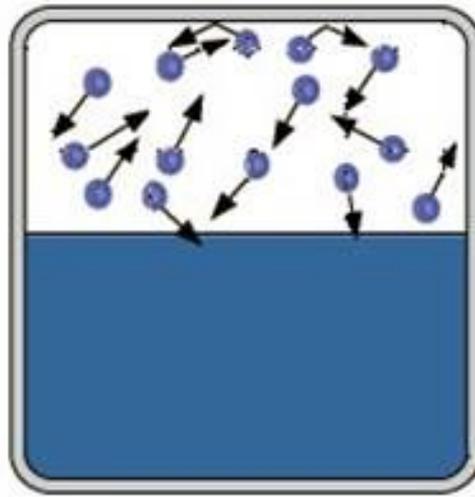
Волосяной  
гигрометр



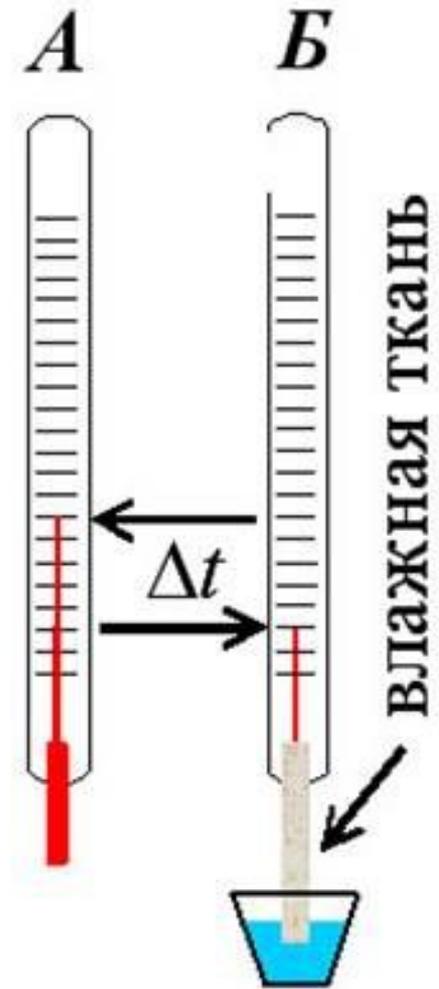
# Психрометр Августа



(a)



(б)



(в)

## ЗАНЯТИЕ № 22

ХАРАКТЕРИСТИКА ЖИДКОГО  
СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.  
ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ЖИДКОСТИ.  
ЭНЕРГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.  
ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТИ  
С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ.  
КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Вещество в жидком состоянии сохраняет свой объем и принимает форму сосуда, в который ее наливают, так как:

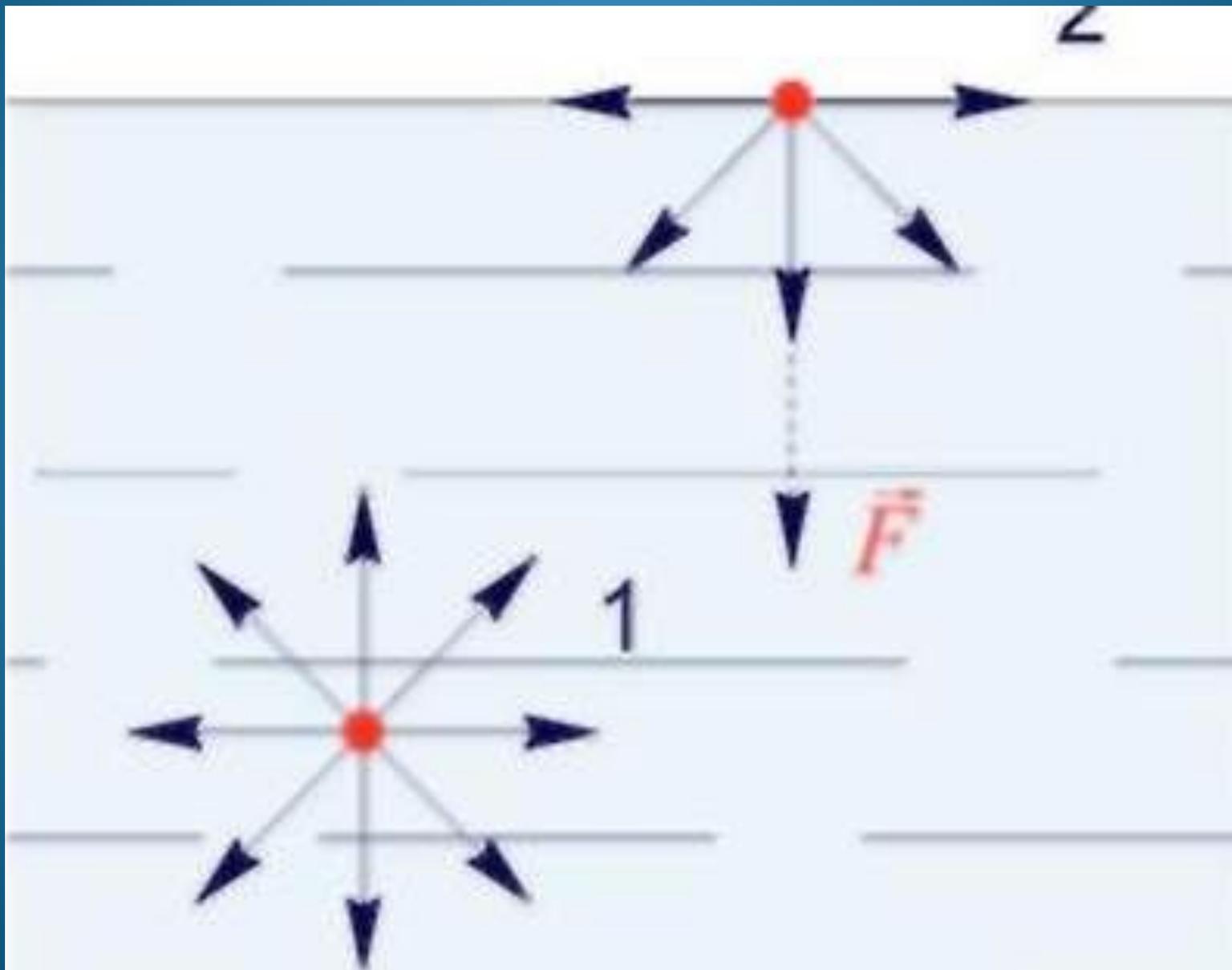
- расстояния между молекулами меньше радиуса молекулярного действия;
- между молекулами жидкости действуют силы притяжения;
- молекулы совершают колебательные движения и поступательные перемещения (перескоки);

-наблюдается ближний порядок в расположении молекул или атомов (упорядочение в небольшом объеме).

Жидкости проявляют свойства

газов	твердых тел
текучесть	сохраняет постоянным объем
принимает форму сосуда	малая сжимаемость
	хрупкость при кратковременном воздействии
	упругость

# ЭНЕРГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ



Равнодействующая сил, действующих на молекулы, находящиеся внутри жидкости равна нулю. На молекулы поверхностного слоя действует равнодействующая молекулярных сил, направленная вглубь жидкости, поэтому все молекулы поверхностного слоя толщиной  $r_m$  втягиваются внутрь жидкости. При этом избыток потенциальной энергии молекул (свободная энергия  $\Delta \Pi$ ) расходуется на сокращение свободной поверхности жидкости.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

За счет свободной энергии может быть произведена работа, связанная с уменьшением свободной поверхности жидкости.

Чтобы вывести молекулы, находящиеся внутри жидкости на поверхность нужно произвести работу, которая нужна для увеличения свободной поверхности жидкости.

$$\Delta \Pi = \sigma \Delta S; \Delta \Pi = A; A = \sigma \Delta S$$

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от *рода жидкости и внешних условий*.

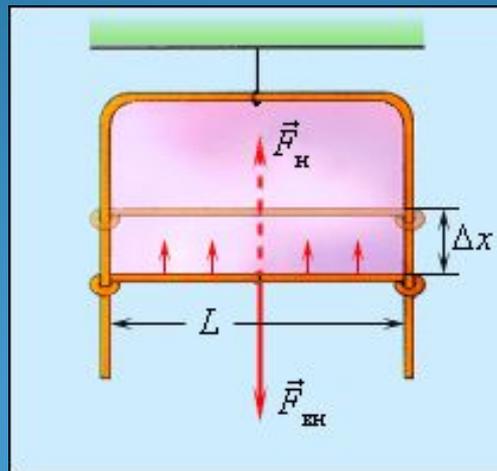
$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}$$
$$[\sigma] = \left[ \frac{1 \text{ Дж}}{\text{м}^2} \right]$$

*Коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе молекулярных сил по сокращению свободной поверхности жидкости на единицу.*

$$\sigma_{\text{воды}} = 0,072 \text{ Дж/м}^2$$

Жидкость всегда стремится к такому состоянию, когда площадь ее свободной поверхности имеет наименьшую величину.

# СИЛА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ



$$A = \sigma \Delta S;$$

$\Delta S = 2 \Delta x L$  – так как у поверхности пленки две линии соприкосновения с поперечиной;

$$A = \sigma 2 \Delta x L,$$

с другой стороны:  $A = 2 F_{\text{н}} \Delta x$

$$\sigma 2 \Delta x L = 2 F_{\text{н}} \Delta x$$

$$F_{\text{н}} = \sigma L$$

Силу, вызывающую сокращение свободной поверхности жидкости и направленную по касательной к этой поверхности, называют *силой поверхностного натяжения*.

Поверхностный слой всегда находится в состоянии натяжения.

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{L}$$
$$[\sigma] = \left[ \frac{1\text{Н}}{1\text{М}} \right]$$

Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости.

Возникновение сил поверхностного натяжения является результатом действия молекулярных сил.

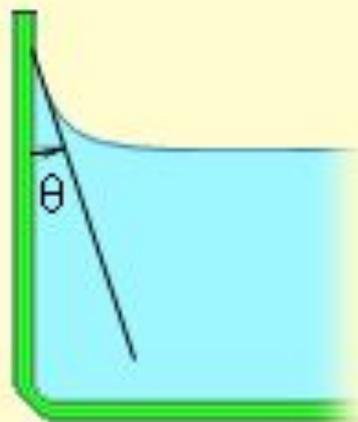
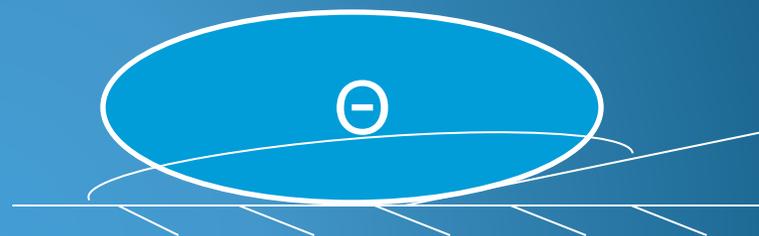
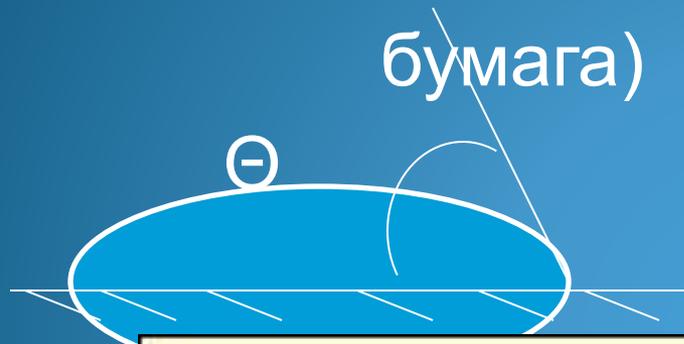
Свойства сил поверхностного натяжения:

1. Действуют вдоль поверхности жидкости.
2. Направлены в сторону жидкости.
3. Перпендикулярны границе свободной поверхности жидкости.

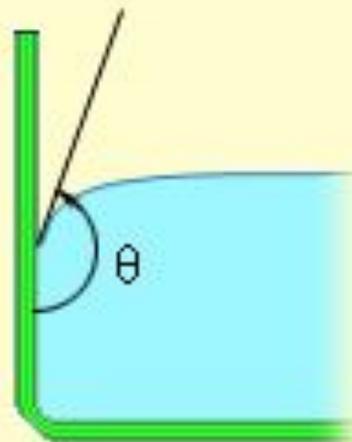
1. Домашний эксперимент: на поверхность воды положите две спички и куском мыла коснитесь воды между спичками. Повторите опыт, коснувшись кусочком сахара. Результаты опыта объясните.

Смачивающая  
жидкость (вода и стекло,  
ртуть и цинк)

Несмачивающая  
жидкость (ртуть и стекло,  
вода и промасленная



(1)



(2)

$\Theta$  – *краевой угол* составлен касательной к поверхности жидкости и поверхностью твердого тела, внутри которого заключена жидкость.

Полное смачивание  $\Theta = 0^{\circ}$

Полное несмачивание  $\Theta = 180^{\circ}$

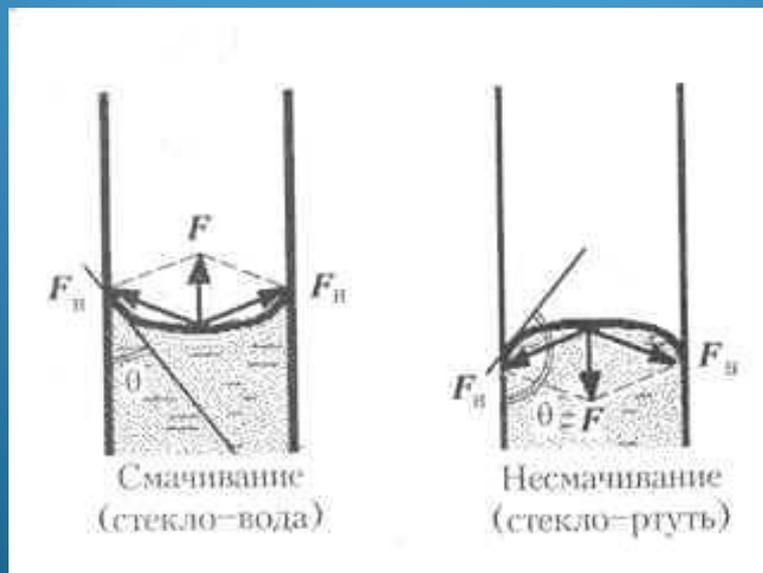
Смачивание возникает, если силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше, чем между молекулами жидкости и твердого тела.

Несмачивание возникает, если силы взаимодействия между молекулами жидкости больше, чем между молекулами жидкости и твердого тела.

# Применение явления смачивания и несмачивания:

- моющие средства,
- обогащение руды (флотация),
- водоотталкивающие покрытия.

## ЛАПЛАСОВСКОЕ ДАВЛЕНИЕ



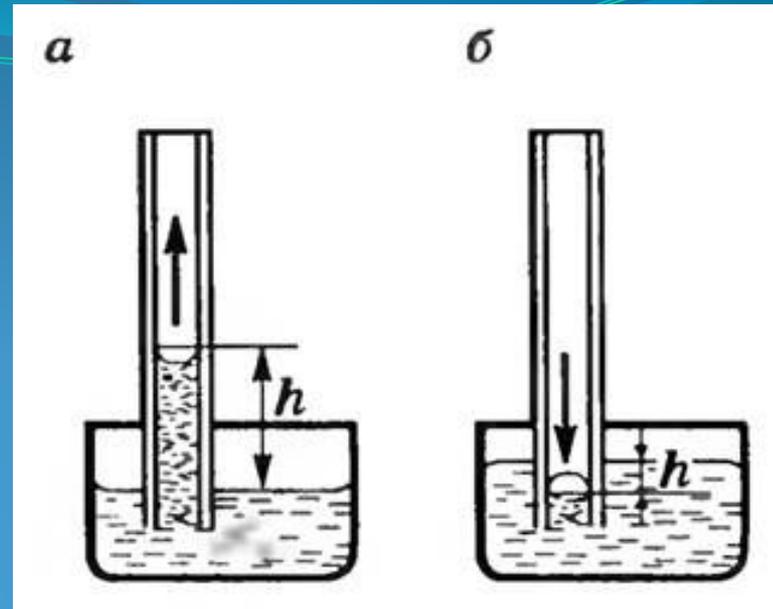
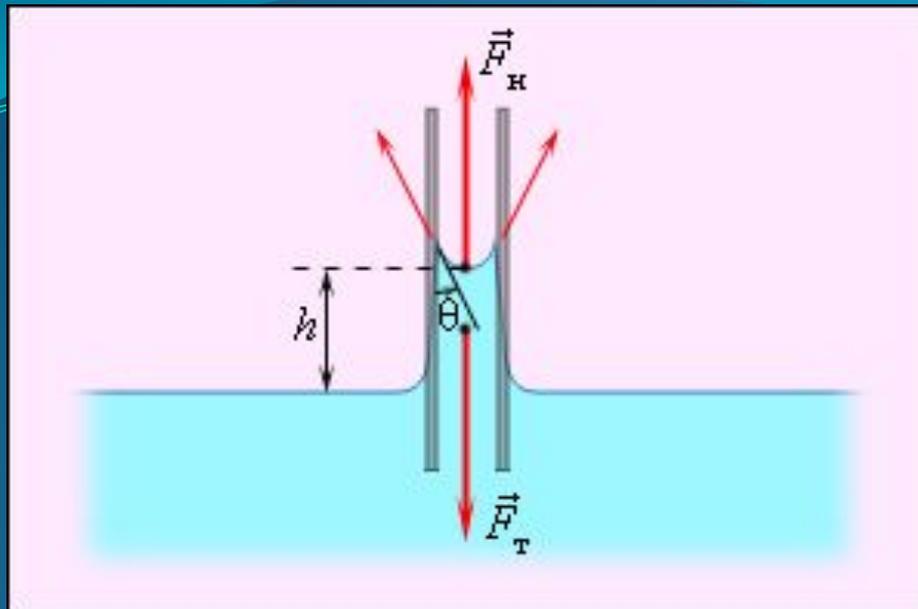
*Мениск* – искривленная поверхность сферической формы.

$P_{\text{л}}$  – лапласовское (дополнительное) давление под искривленной поверхностью жидкости.

$$P_{\text{л}} = \frac{F_{\text{н}}}{S} = \frac{\sigma L}{S} = \frac{\sigma 2 \pi r}{\pi r^2} = \frac{2 \sigma}{r}$$
$$P_{\text{л}} = \frac{2 \sigma}{r}$$

$r$  – радиус кривизны мениска.

*Капиллярность* – это явление подъема (опускания) жидкости в сосудах малого диаметра.



Жидкость поднимается (опускается) в капилляре пока  $P_{л} = P_{гидр}$

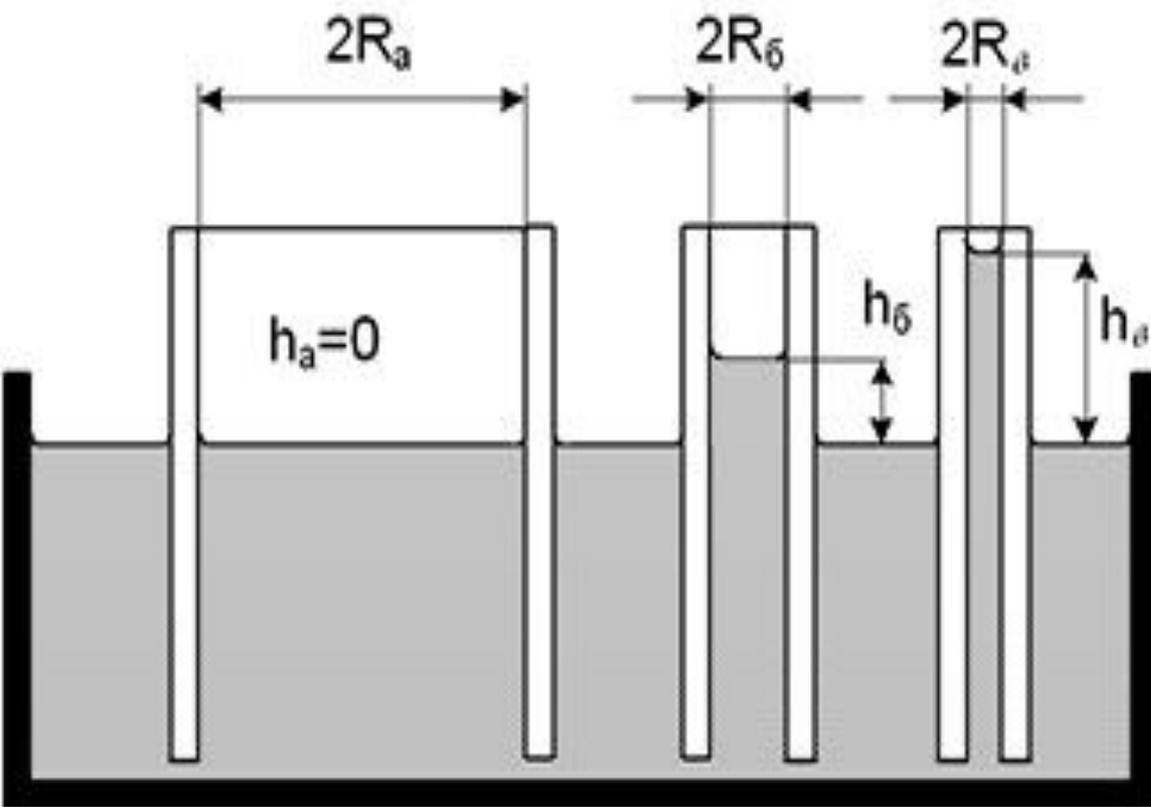
$$P_{л} = \frac{2\sigma}{r}, P_{гидр} = \rho gh$$

$$\frac{2\sigma}{r} = \rho gh$$

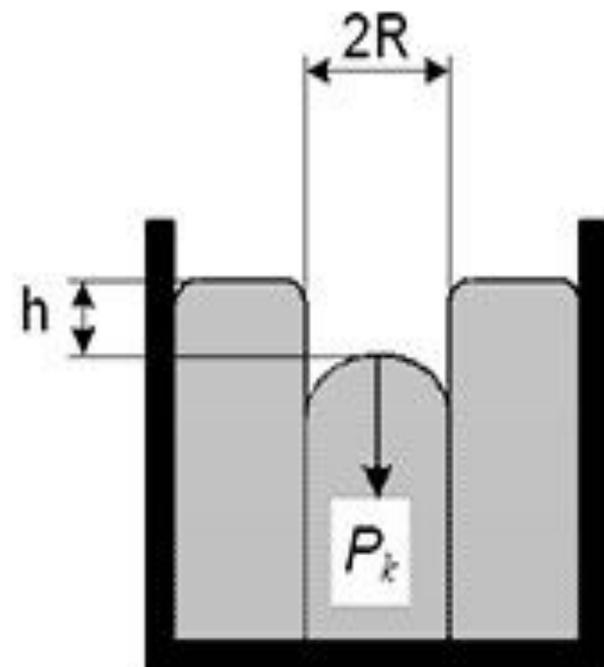
$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr}$$

# ЗАВИСИМОСТЬ ВЫСОТЫ ПОДЪЕМА ЖИДКОСТИ ОТ ДИАМЕТРА КАПИЛЛЯРА

a)



б)



# ПРИМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОСТИ В ТЕХНИКЕ, БЫТУ, ПРИРОДЕ

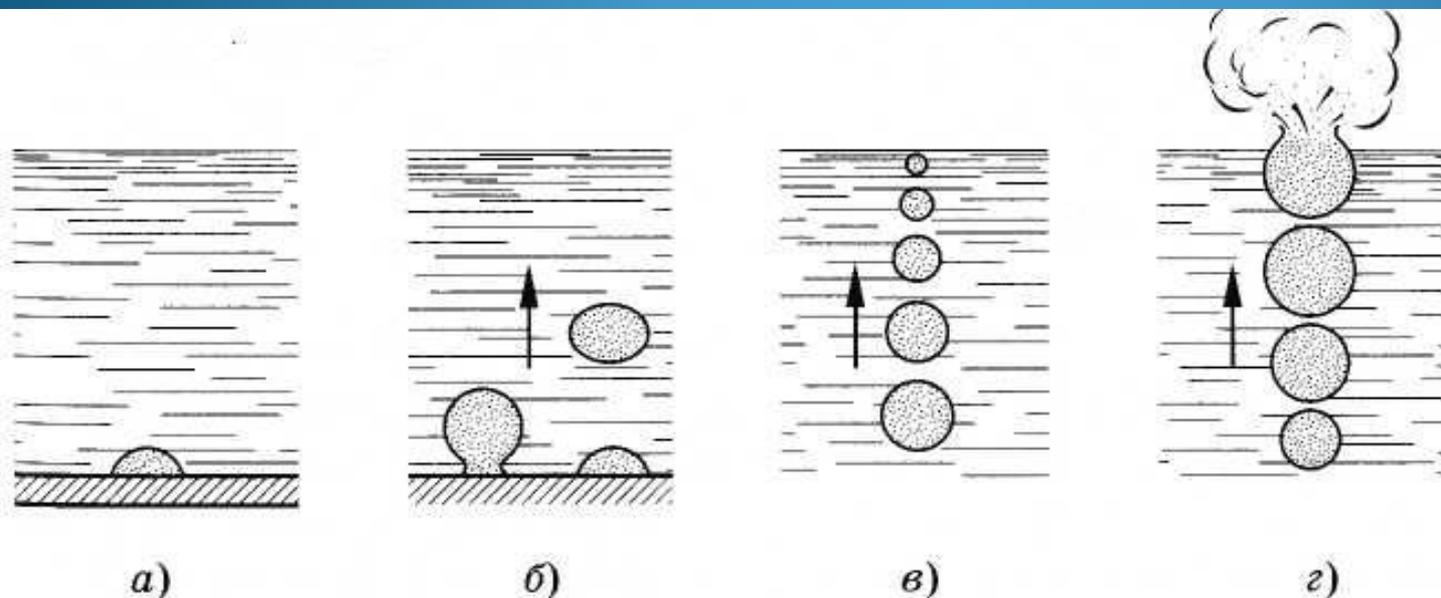
- сушка пористых тел,
- промакательная бумага,
- перья плакатные,
- капилляры в организме человека,
- капилляры в деревьях, почве,
- фитиль в спиртовке, керосиновой лампе.

В США для повышения продуктивности полупустынных пастбищ измельчают кусты и разбрасывают по пастбищу. Они впитывают дождевую воду, которая затем просачивается в почву. Создается запас влаги в 8 раз больше обычного. Температура снижается с  $60^{\circ}$  до  $40^{\circ}$ , что допустимо для роста трав. Продуктивность таких пастбищ возрастает в 5 раз.

## ЗАНЯТИЕ № 25

КИПЕНИЕ. ЗАВИСИМОСТЬ  
ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ.  
ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР И ЕГО  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ.

Парообразование, которое происходит в объеме всей жидкости при постоянной температуре, называется *кипением*.



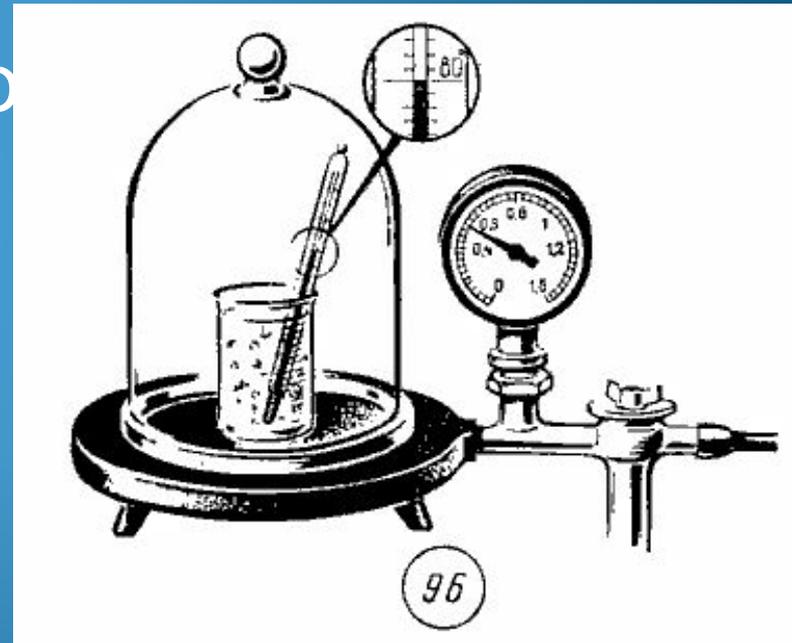
При нагревании воды на дне и стенках сосуда появляются пузырьки газа. При дальнейшем нагревании число пузырьков увеличивается, а их объем возрастает. Внутри пузырьков кроме воздуха имеется насыщенный водяной пар. Рост пузырьков объясняется ростом давления насыщенного пара воды. Противодействуют расширению: атмосферное, гидростатическое и Лапласовское давления. При росте пузырька Лапласовское давление уменьшается, а пузырек растет еще больше.

Архимедова сила отрывает пузырек ото дна и поднимает вверх, на месте оторвавшегося находится зародыш нового.

*1 этап.* При нагревании жидкости ее верхние слои более холодные и при подъеме пузырька водяной пар в нем конденсируется и объем пузырька уменьшается. Многие пузырьки не достигая поверхности исчезают. Так происходит до тех пор пока температура всей жидкости не станет одинаковой.

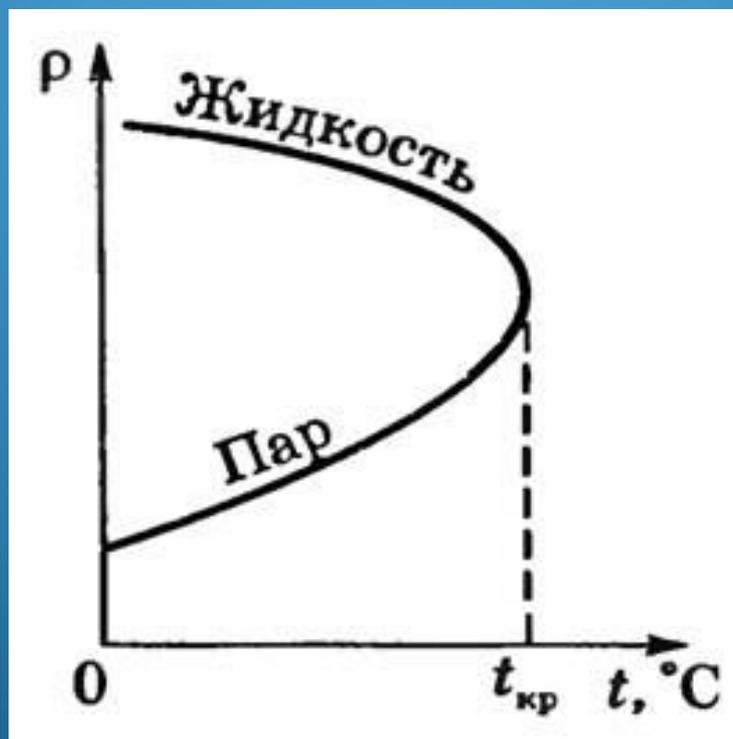
*2 этап.* Температура всей жидкости одинакова. Теперь объем пузырьков при подъеме будет возрастать (т.к. давление насыщенного пара меняться не будет, а при подъеме гидростатическое давление будет уменьшаться). Пузырек будет расти и все его внутреннее пространство заполняется насыщенным паром. На поверхности жидкости пузырек лопается, а насыщенный пар выходит в окружающую среду.

Кипение жидкости происходит при одинаковой температуре всей жидкости, когда давление насыщенного пара этой жидкости, равно внешнему давлению. Температура называется *температурой кипения*. При уменьшении внешнего давления температура кипения уменьшается и наоборот.



# КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

*Критическая температура*  $T_{кр}$  — это такая температура, при которой плотность жидкости и плотность ее насыщенного пара становятся одинаковыми.



Давление насыщенного пара какого-либо вещества при его критической температуре называется критическим давлением  $p_{кр}$ . Оно является наибольшим возможным давлением насыщенных паров вещества.

Объем, который занимает вещество при  $p_{кр}$  и  $t_{кр}$ , называется критическим объемом  $V_{кр}$ . Это наибольший объем, который может занимать имеющаяся масса вещества в жидком состоянии. При критической температуре различие между газом и жидкостью исчезает.

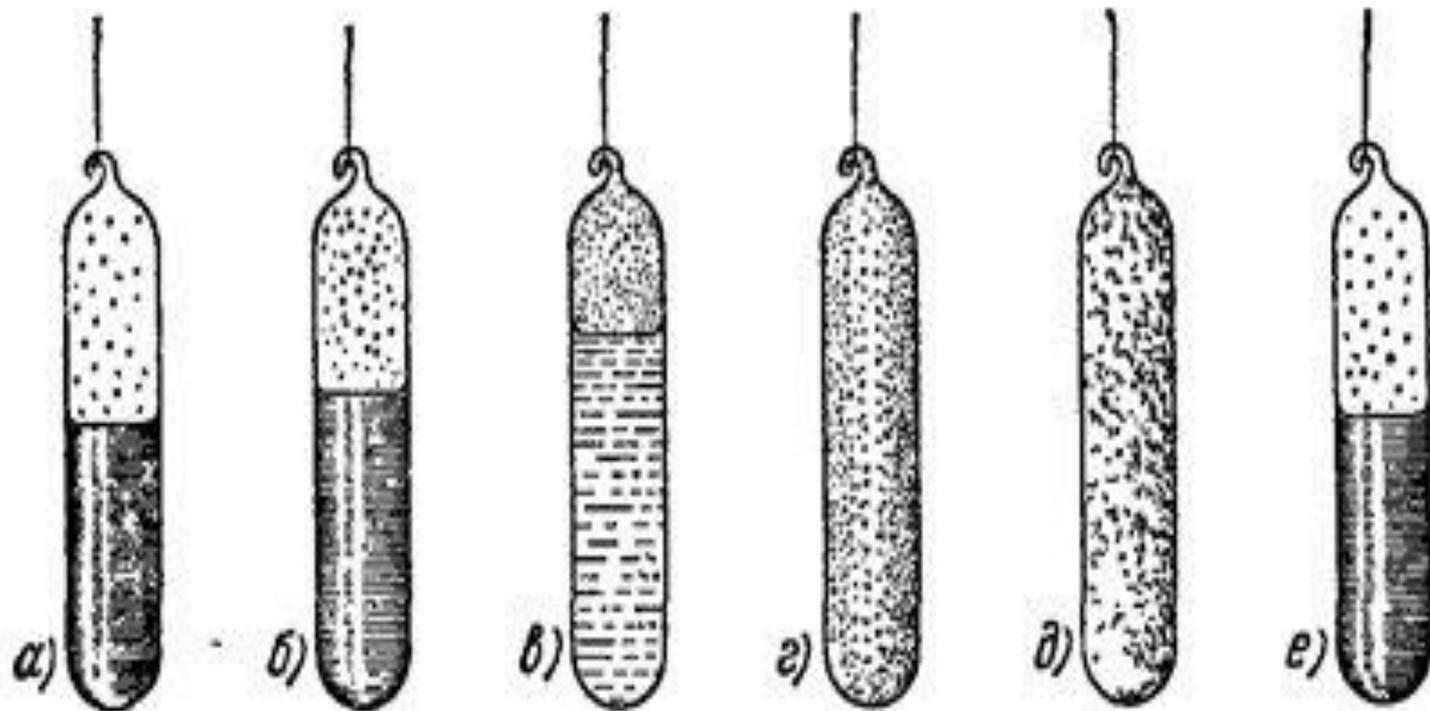


Таблица 8.4. Точка кипения некоторых сжиженных газов

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$
Кислород	-183	Азот	-196	Водород	-253
Аргон	-186	Неон	-246	Гелий	-269

Выше критической температуры жидкость не образуется даже при очень высоких давлениях.

Обычно газом называют вещество в газообразном состоянии, когда его температура выше критической. Паром называют также вещество в газообразном состоянии, но когда его температура ниже критической. Пар можно перевести в жидкость одним только увеличением давления, а газ нельзя.

В настоящее время все газы переведены в жидкое состояние при очень низких температурах. Кислород:  $-118\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; азот:  $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; водород:  $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Последним в 1908 г. переведен гелий ( $t_{\text{кр}} = -269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

- охлаждающие смеси,
- адиабатическое расширение,
- адиабатическое расширение с совершением работы,
- каскадное (ступенчатое) охлаждение.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

1. Для получения низких температур.
2. Для автогенной сварки (жидкий кислород).
3. На заводах газированных вод (жидкая углекислота).
4. В изотермических вагонах «мороженое» («сухой лед» – твердая углекислота).
5. Усиление доменного процесса (жидкий воздух).
6. Взрывчатые вещества – оксиликвиты (сажа, древесные опилки, пропитанные жидким воздухом).

## ЗАНЯТИЕ № 26

ХАРАКТЕРИСТИКА ТВЕРДОГО  
СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА. ПЛАВЛЕНИЕ  
И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ.  
ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ  
ТЕЛ И ЖИДКОСТЕЙ

Твердые вещества сохраняют форму и объем.

По этим внешним признакам к твердым относят *кристаллические* и *аморфные* вещества.

аморфные	кристаллические
стекло, битум, смола	алмаз, соль, сахар, металлы
ближний порядок в расположении атомов (вязкие жидкости)	дальний порядок в расположении атомов (кристаллы)
изотропны (свойства одинаковы по всем направлениям)	монокристаллы - анизотропны (свойства зависят от направления: теплопроводность, прочность, упругость) поликристаллы - изотропны

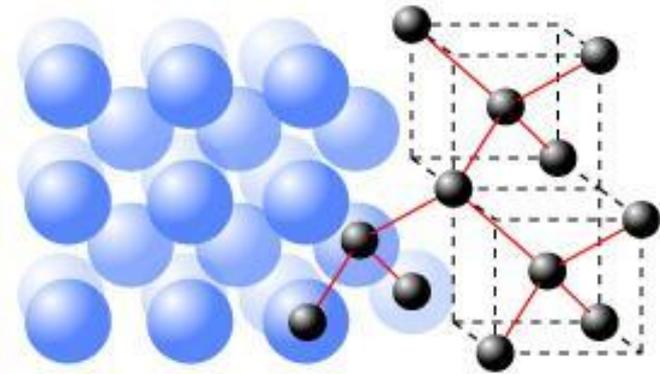
*Аморфные вещества* не имеют температуры плавления, так как являются вязкими жидкостями.

*Кристаллические вещества* имеют температуру плавления, которая соответствует разрушению кристаллической решетки, у каждого вещества она своя.

Любые отступления от идеального порядка в кристалле называют *дефектами* пространственной решетки.

# КРИСТАЛЛЫ

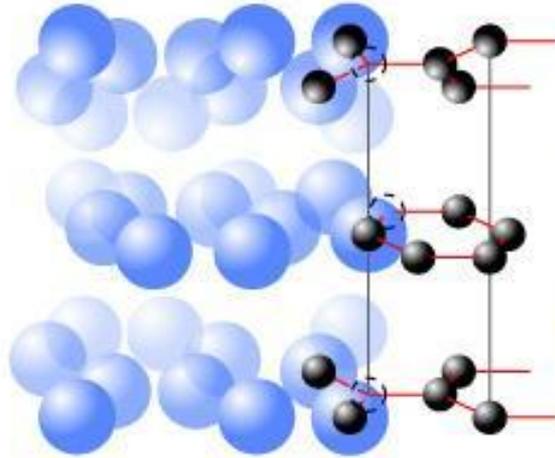
УПАКОВКА АТОМОВ  
И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ  
РЕШЕТКА АЛМАЗА



АЛМАЗ



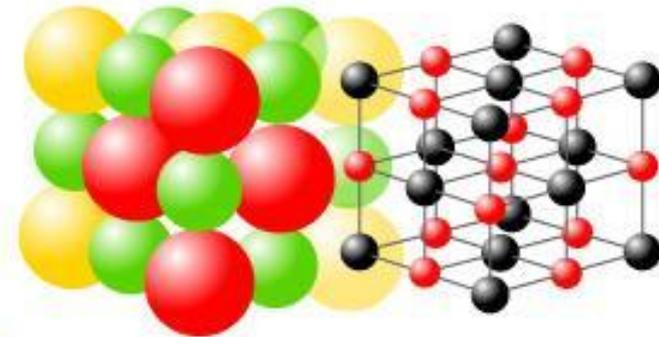
УПАКОВКА АТОМОВ  
И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ  
РЕШЕТКА ГРАФИТА



ГРАФИТ



УПАКОВКА АТОМОВ  
И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ  
РЕШЕТКА  
ПОВАРЕННОЙ СОЛИ



ПОВАРЕННАЯ СОЛЬ



## *Дефекты* кристаллических решеток:

- отсутствие частиц в узлах решетки,
- смещение частиц в промежутки между узлами,
- наличие чужеродных атомов в отдельных узлах решетки или между узлами.

## Дефекты влияют на свойства твердых тел:

- прочность,
- пластичность,
- электропроводность,
- упругость.

## ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

1. *Ионная* (поваренная соль) – в узлах решетки положительные и отрицательные ионы, между ними действуют силы электростатического притяжения и отталкивания.

2. *Атомная* (алмаз) – в узлах решетки нейтральные атомы, между которыми действуют ковалентные связи (осуществляются за счет двух валентных электронов по одному от каждого атома)

3. *Металлическая* (все металлы) – в узлах положительно заряженные ионы металла.

Валентные электроны, слабо связанные с атомом могут беспрепятственно двигаться между атомами. Электроны в металлах называют электронным газом. Силы взаимодействия электрические.

4. *Молекулярная* (лед, нафталин, органические соединения) - в узлах решетки нейтральные молекулы вещества. Силы взаимодействия молекулярные.

*Жидкие кристаллы* – это фазовое состояние, в которое переходят некоторые вещества при определенных условиях (температура, давление, концентрация в растворе). Жидкие кристаллы обладают одновременно свойствами как жидкостей (текучесть), так и кристаллов (анизотропия). По структуре жидкие кристаллы представляют собой вязкие жидкости, состоящие из молекул вытянутой или дискообразной формы, определенным образом упорядоченных во всем объеме этой жидкости. Наиболее характерным свойством является их способность изменять ориентацию молекул под воздействием электрических полей.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

1. Термография (тепловизионные системы: деятельность организма, пожарные, военные службы, техника, кондиционирование, теплоизоляция; микроболометрические датчики).
2. Для нанесения в виде пленки на транзисторы, интегральные схемы, печатные платы электронных схем (неисправные элементы—сильно нагретые или холодные, неработающие – сразу заметны по ярким цветовым пятнам).

3. Индикаторы для разных диапазонов температур различных конструкций.
4. В медицине как индикаторы (определение воспалений, опухолей).
5. Для обнаружения паров вредных химических соединений, гамма и ультрафиолетовых излучений.
6. В измерителях давления и детекторах ультразвука.
7. В информационной технике.
8. В телевизорах с жидкокристаллическим экраном.

Процесс перехода вещества из твёрдого кристаллического состояния в жидкое называют ***плавлением***.

Это процесс происходит при повышении температуры.

При определённой температуре, которую называют ***температурой плавления***, кристаллическая решётка твёрдого тела начинает разрушаться.



Процесс фазового перехода из жидкого состояния к твёрдому называется *кристаллизацией*.



В отличие от плавления, когда вещество получает тепло, при кристаллизации оно его отдаёт, а его температура снижается.

Температура, при которой происходит этот процесс, называется *температурой кристаллизации*.

Для чистого вещества температура плавления равна температуре кристаллизации.



Начальное состояние – a: нагревание льда до температуры плавления  $0^{\circ}\text{C}$ ;

a – b: процесс плавления при постоянной температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ;

b – точка с некоторой температурой: нагревание образовавшейся из льда воды до некоторой температуры;

Точка с некоторой температурой – c: охлаждение воды до температуры замерзания  $0^{\circ}\text{C}$ ;

c – d: процесс замерзания воды при постоянной температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ;

d – конечное состояние: остывание льда до некоторой отрицательной температуры.

# ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

$$0^{\circ} \text{ C} - l_0$$

$$t^{\circ} \text{ C} - l_t$$

$$\Delta t = t - 0 = t$$

$$\Delta l = l_t - l_0$$

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$$

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t}$$

Коэффициент линейного расширения показывает на какую часть длины тела, взятого при  $0^{\circ} \text{ C}$ , изменится его длина при нагревании на  $1^{\circ} \text{ C}$ .

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} = 1 \text{град}^{-1}$$

$$l_t - l_0 = \alpha l_0 t$$

$$l_t = l_0 (1 + \alpha t)$$

## ОБЪЕМНОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

$$0^\circ \text{C} - V_0$$

$$t^\circ \text{C} - V_t$$

$$\Delta t = t - 0 = t$$

$$\Delta V = V_t - V_0$$

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta t$$

$\beta$  – коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t}$$

Коэффициент объемного расширения показывает на какую часть объема тела, взятого при  $0^{\circ}\text{C}$ , изменится его объем при нагревании на  $1^{\circ}\text{C}$ .

$$\beta = \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3 \times \text{град}} = 1 \text{град}^{-1}$$

$$V_t - V_o = \beta V_o t$$

$$V_t = V_o (1 + \beta t)$$

$$\beta = 3\alpha$$

ПЛОСКОСТНОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

$$S_t = S_o (1 + 2\alpha t)$$

## 1. *Тепловое расширение жидкостей.*

Тепловое расширение жидкости принято характеризовать его средним коэффициентом объемного расширения в рассматриваемом интервале температур.

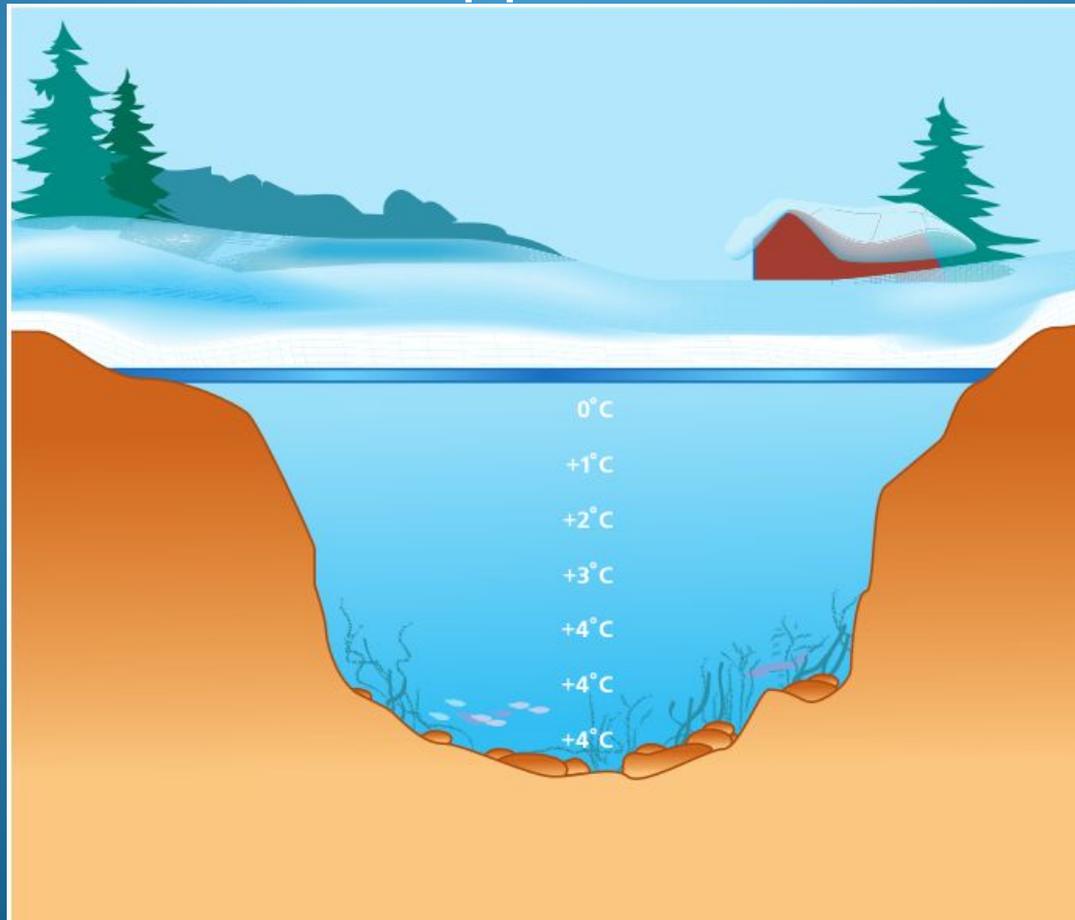
Жидкостные термометры построены на принципе теплового расширения жидкости в стеклянном резервуаре. В качестве рабочих веществ применяют ртуть и органические жидкости - этиловый спирт, толуол, пентан. В зависимости от вида рабочего вещества жидкостные термометры подразделяют на ртутные и нертутные.

## 2. Особенности теплового расширения воды.

Примеры расширения воды в природе.

Самое распространенное на поверхности Земли вещество вода имеет особенность, отличающую её от большинства других жидкостей. Она расширяется при нагревании только выше  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . От  $0$  до  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  объем воды, наоборот, при нагревании уменьшается. Таким образом, наибольшую плотность вода имеет при  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эти данные относятся к пресной (химически чистой) воде. У морской воды наибольшая плотность наблюдается примерно при  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

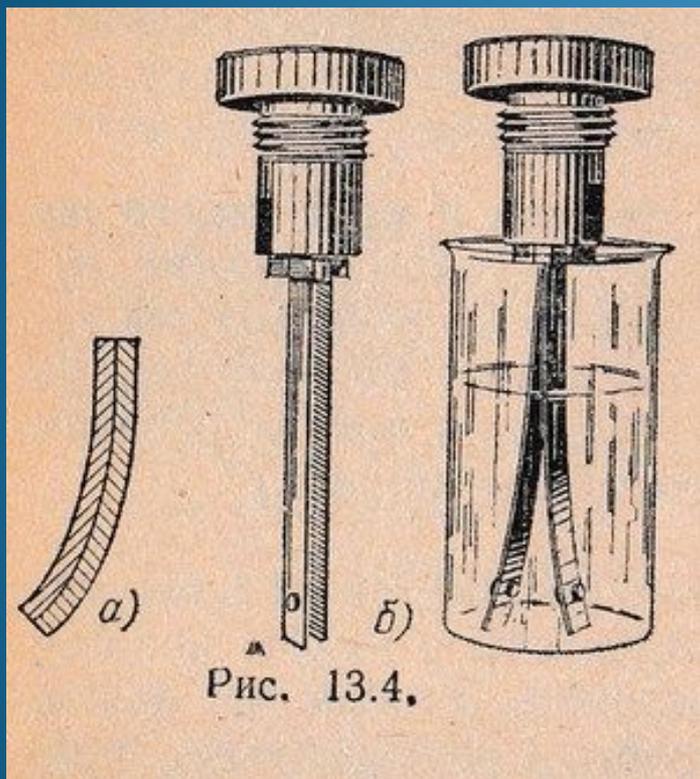
Увеличение давления тоже понижает температуру наибольшей плотности воды. Особенности расширения воды имеют громадное значение для климата Земли.



### *3. Значение теплового расширения.*

Расширение тел при нагревании и сжатие при охлаждении в природе играют огромную роль. Неравномерный прогрев воздуха у поверхности Земли создает конвекционные потоки (ветер), обуславливающие изменение погоды. Неравномерный прогрев воды в морях и океанах создает течения, оказывающие влияние на климат прибрежных стран. Особенно резкие колебания температуры происходят в горных местностях. Это приводит к поочередному расширению и сжатию горных пород.

Так как такие изменения объема зависят от рода вещества, то в горных породах, имеющих сложный состав, возникают трещины, которые постепенно увеличиваются, т. е. происходит разрушение этих пород. В быту и технике зависимость плотности вещества, длины и объема тел от температуры тоже имеет очень большое значение. Зависимость плотности воздуха от температуры используется в квартирах для равномерного распределения тепла, выделяемого печами и радиаторами, в печах — для создания тяги, в холодильниках — для равномерного охлаждения камеры и т. д.



В различного рода автоматических устройствах используются биметаллические пластинки. Такая пластинка состоит из двух разнородных металлических полос, склепанных друг с другом. При нагревании биметаллической пластинки одна полоса удлиняется больше другой, и вся пластинка изгибается; контакт на биметаллических пластинках при нагревании замыкается.

Такие пластинки используются для автоматического замыкания и размыкания электрических цепей в термостатах, в холодильниках, в противопожарных устройствах и т. п.

Зависимость длины от температуры приходится учитывать при натягивании проводов на линиях электропередач, устройстве паропроводов, сооружении мостов, прокладке рельсов и т. д. Для получения спаев металла со стеклом, например, при изготовлении электрических ламп и радиоламп, используются металлы и стекла с близкими коэффициентами расширения.

# ЗАНЯТИЕ № 27

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ.  
ЗАКОН ГУКА.  
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

## ДЕФОРМАЦИИ

Изменение объема или формы тела под действием каких-либо причин называется *деформацией*.

*Абсолютная деформация* – это числовое изменение какого-либо размера тела под действием сил.

*Относительная деформация* показывает какую часть от первоначального размера тела составляет абсолютная деформация.

## Виды деформаций:

- продольного растяжения,
- продольного сжатия,
- всестороннего растяжения,
- всестороннего сжатия,
- поперечного изгиба,
- продольного изгиба,
- кручения,
- сдвига,
- среза.

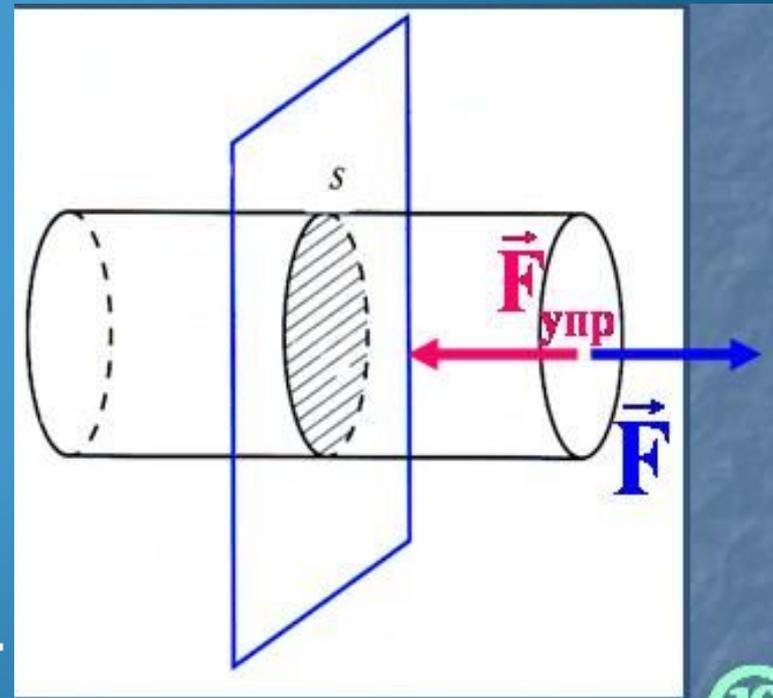
# МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Механическое напряжение, возникающее при одностороннем продольном растяжении, определяется силой, действующей на единицу площади поперечного сечения упруго деформированного тела

$$\sigma = \frac{F}{S}; [\sigma] = \left[ \frac{1\text{Н}}{1\text{М}^2} \right] = [1 \text{ Па}]$$

Если  $F$  перпендикулярна  $S$  возникает нормальное механическое напряжение  $\sigma_n$ .

Если  $F$  параллельна  $S$  возникает касательное механическое напряжение  $\sigma_k$ .



**Закон Гука.** Относительная деформация прямо пропорциональна возникающему механическому напряжению.

$$\varepsilon = K \sigma ,$$

где

$\varepsilon$  – относительная деформация,

$K$  – коэффициент упругости,

$\sigma$  – механическое напряжение.

ЗАКОН ГУКА ДЛЯ ОДНОСТОРОННЕГО  
ПРОДОЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

$l_0$  – длина тела,

$\Delta l$  – абсолютная деформация,

$$K = \frac{1}{E},$$

где

$E$  – модуль упругости (модуль Юнга),

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где

$F$  – действующая на тело сила,

$S$  – площадь поперечного сечения тела,

Тогда закон Гука:

$$\sigma = E \varepsilon \quad \text{или} \quad \frac{F}{S} = E \left( \frac{\Delta l}{l_0} \right)$$

# Модуль упругости - E

Модуль Юнга зависит только от свойств материала и не зависит от размеров и формы тела.

Модуль Юнга показывает напряжение, которое необходимо приложить к телу, чтобы удлинить его в 2 раза.

Для различных материалов модуль Юнга меняется в широких пределах.

Для стали, например,  $E \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ , а для резины  $E \approx 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ .

## ЭНЕРГИЯ УПРУГО – ДЕФОРМИРОВАННОГО ТЕЛА

$$\Delta l = \frac{l_0 F}{S E}$$

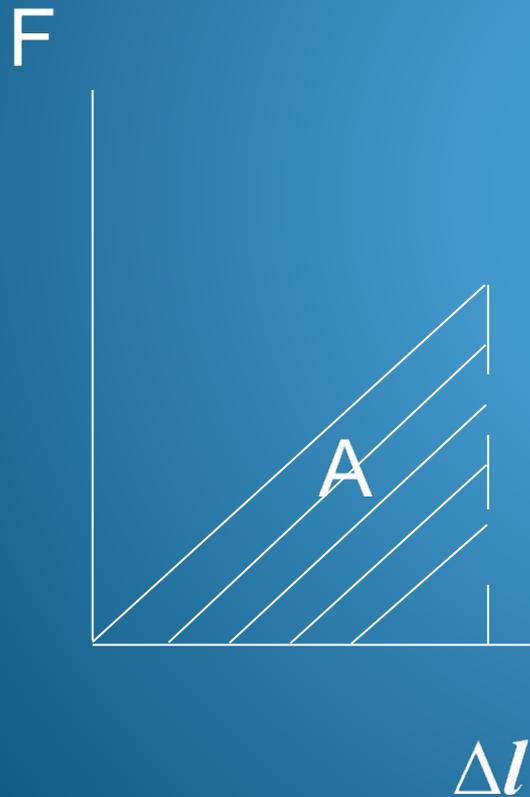
При деформации тело приобретает потенциальную энергию и само может совершить работу.

$$П = A$$

$$F = E S \left( \frac{\Delta l}{l_0} \right) = k \Delta l$$

$k$  – коэффициент жесткости

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



$$A = \frac{F \Delta l}{2}$$

$$A = \frac{k \Delta l^2}{2}$$

$$\Pi = \frac{k \Delta l^2}{2}$$

# Механические свойства твердых тел:

- **Механические свойства** характеризуют способность материала сопротивляться воздействию внешних сил.
- **Прочность** – способность материала сопротивляться разрушению под воздействием нагрузок.
- **Пластичность** – способность материала изменять форму и размер под действием внешних сил.
- **Упругость** – способность материала восстанавливать первоначальную форму и размер.
- **Твердость** – сопротивление твердого тела изменению формы (деформации)

Все эти свойства проявляются под действием статических сил (постоянных по величине и направлению)

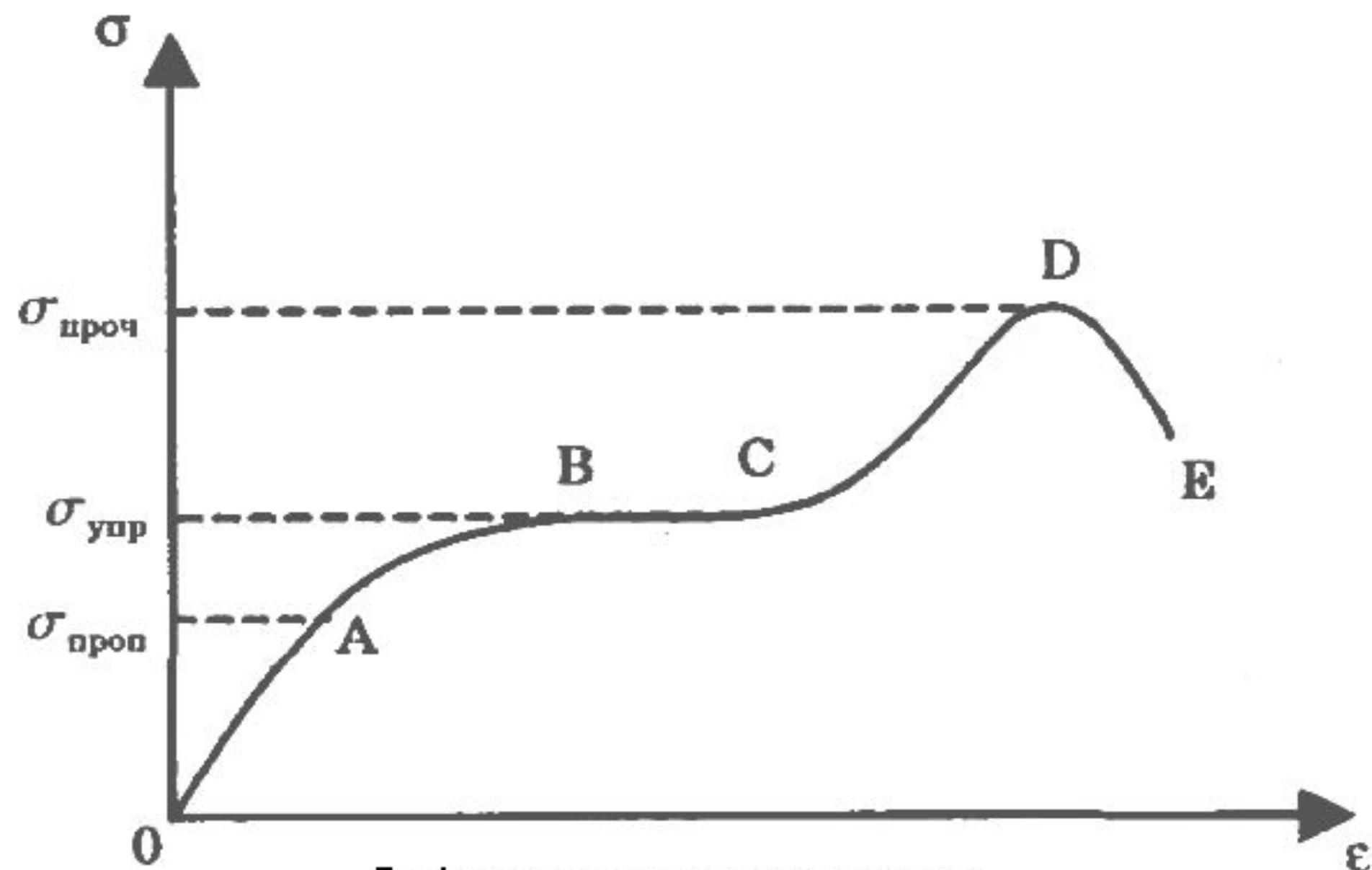


График зависимости механического напряжения от относительного удлинения  
Участок OA - область пропорциональности:  
на этом участке выполняется закон Гука.

На диаграмме растяжения:

- участок АО, на котором выполняется закон Гука, соответствует упругой деформации  $\sigma_{\text{проп}}$  – предел упругости;
- участок АВСД соответствует пластической деформации;
- на участке АВ возникает явление текучести твердого тела, т. е. относительная деформация растет быстрее механического напряжения;
- на участке ВС механическое напряжение остается постоянным, относительная деформация увеличивается,  $\sigma_{\text{упр}}$  – предел текучести;
- точка D соответствует пределу прочности  $\sigma_{\text{проч}}$ .

Механическое напряжение, при котором наступает разрушение тела, называется ***пределом прочности*** вещества.

***Запасом прочности*** называется число, показывающее во сколько раз предел прочности больше допустимого на практике механического напряжения.