

§29. СТРОЕНИЕ АТОМА

Атом — наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

Строение атома напоминает структуру Солнечной системы ①. Вокруг ядра, находящегося в центре атома, движутся электроны. В отличие от планет, притягивающихся к Солнцу гравитационными силами, отрицательно заряженные электроны удерживаются вблизи положительно заряженного ядра силами электромагнитного взаимодействия. Ядро атома любого химического элемента состоит из двух видов элементарных частиц: положительно заряженных **протонов** и электронейтральных **нейтронов**. Заряд протона $+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл равен по модулю заряду электрона.

Зарядовое число Z равно числу протонов в ядре.

Заряд ядра атома ($+Ze$) — главная характеристика химического элемента. Зарядовое число ядра Z совпадает с порядковым номером химического элемента в Периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева.

Протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — **нуклона** (от лат. *nucleus* — ядро) ②. Масса нейтрона близка к массе протона и почти в 2000 раз превосходит массу электрона, поэтому почти вся масса атома сосредоточена в ядре.

Массовое число A — число нуклонов в ядре атома

(суммарное число протонов Z и нейтронов N):

$$A = Z + N.$$

Зарядовое число Z и массовое число A входят в условное обозначение любого химического элемента X . Слева от символа химического элемента X указываются массовое число A (сверху) и зарядовое число Z (снизу): ${}^A_ZX$.

В целом атом электронейтрален:

положительный заряд его ядра компенсируется отрицательным зарядом электронов, число которых равно числу протонов в ядре. Суммарный заряд электронов в атоме равен $-Ze$. У атома ${}^6_3\text{Li}$ — три электрона.

Наиболее вероятно электроны в атоме движутся вокруг ядра на определенных расстояниях от него, образуя как бы электронные оболочки — внутренние (вблизи ядра) и внешнюю ③. **Валентные электроны**, движущиеся во внешней оболочке, слабее связаны с ядром. Они могут покидать атом, например, при столкновении его с другим атомом.

Согласно современным представлениям, нуклоны являются сложными частицами, состоящими из трех **кварков**: протон из $(u-u-d)$ -кварков, а нейтрон из $(u-d-d)$ -кварков. Заряд кварков дробный: заряд u -кварка $+2e/3$, d -кварка $(-e/3)$.

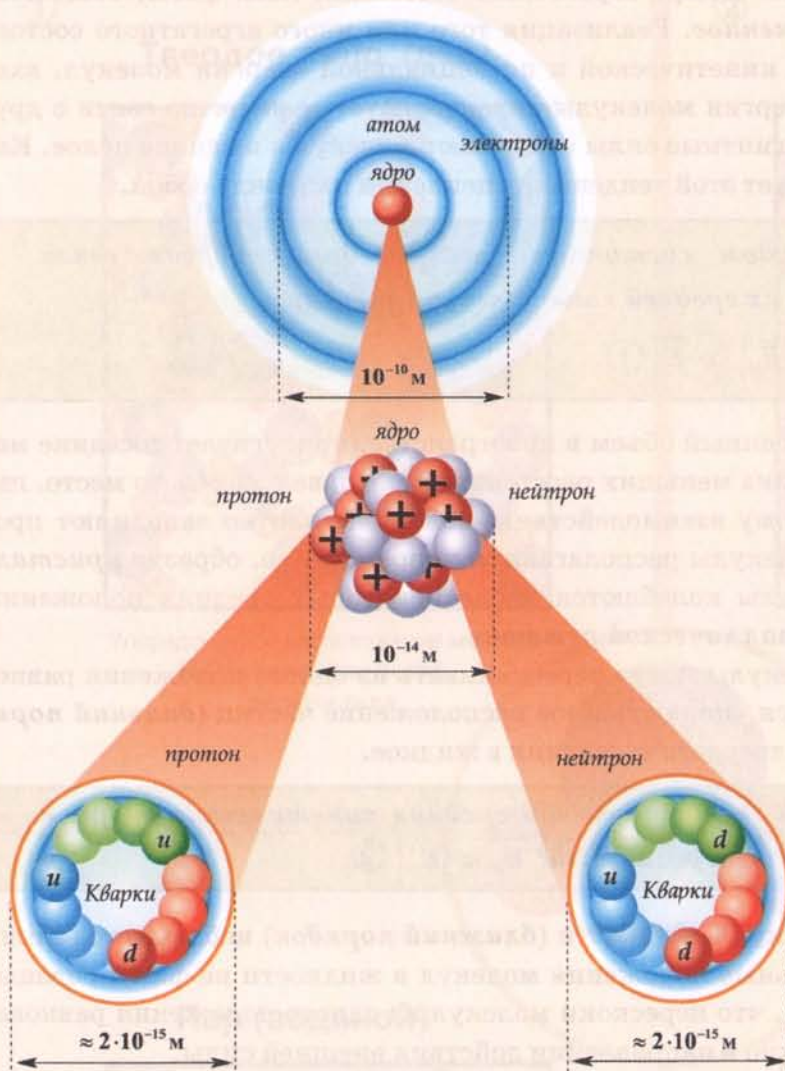
Число нейтронов в ядре ($N = A - Z$) одного и того же элемента ($Z = \text{const}$) может быть различным.

Изотоп — разновидность одного и того же химического элемента, атом которого содержит одинаковое число протонов в ядре и разное число нейтронов ①.

Изотоп водорода (протий), ядром которого является протон, изображается символом ${}^1_1\text{H}$ ④. Более тяжелыми изотопами водорода являются дейтерий ${}^2_1\text{H}$ ⑤ и тритий ${}^3_1\text{H}$ ⑥, ядра которых содержат один и два нейтрона соответственно. Условное обозначение химического элемента позволяет легко определять состав ядра и число электронов в атоме. У изотопа лития ${}^6_3\text{Li}$ в ядре находится 3 протона и 3 нейтрона: $Z = 3$, $N = 6 - 3 = 3$.

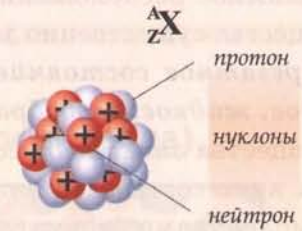
СТРУКТУРА АТОМА

①



ЯДРО АТОМА

②



A – массовое число –
число нуклонов в ядре

N – число нуклонов в ядре

Z – зарядовое число –
число протонов в ядре

$$A = Z + N$$

ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ АТОМА

③

Атом лития



$Z = 3$

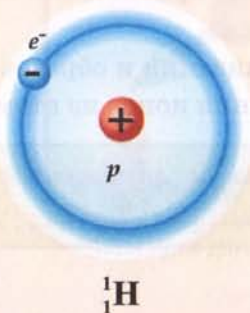
$N = 3$

$$A = Z + N = 6$$

ИЗОТОПЫ АТОМА ВОДОРОДА

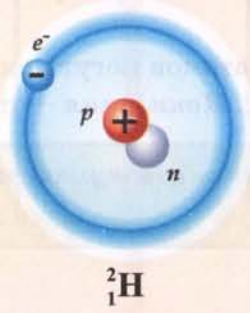
④

Протий



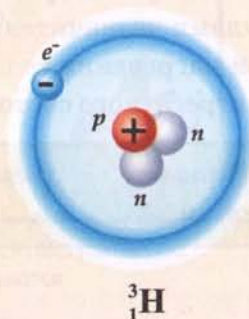
⑤

Дейтерий



⑥

Тритий



§30. АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ТЕЛ

Взаимное расположение, особенности движения и взаимодействия молекул одного и того же вещества существенно зависят от внешних условий (температура, давление) и характеризуют его *агрегатное состояние*. Различают четыре агрегатных состояния (или фазы) вещества: *твёрдое, жидкое, газообразное, плазменное*. Реализация того или иного агрегатного состояния вещества зависит от соотношения кинетической и потенциальной энергии молекул, входящих в его состав. Потенциальная энергия молекулы характеризует ее энергию связи с другими молекулами вещества: электромагнитные силы связывают молекулы в единое целое. Кинетическая энергия молекул препятствует этой тенденции сцепления их между собой.

Вещество находится в твёрдом состоянии, если средняя энергия связи ($E_{св} = |\bar{E}_p|$) молекул много больше их средней кинетической энергии:

$$|\bar{E}_p| \gg \bar{E}_k \quad (1).$$

Каждая молекула, занимая определенный объем в пространстве, притягивает соседние молекулы и одновременно отталкивает их на меньших расстояниях, не давая занять то место, где она сама расположена. Благодаря такому взаимодействию молекулы плотно заполняют пространство. В кристаллическом теле молекулы располагаются упорядоченно, образуя *кристаллическую решетку*. При этом молекулы колеблются около некоторых средних положений равновесия, называемых *узлами кристаллической решетки*.

При нагревании твёрдого тела молекулы могут перескакивать из одного положения равновесия в другое. В результате нарушается упорядоченное расположение частиц (*дальний порядок*) — происходит фазовый переход из твёрдого состояния в жидкое.

Вещество находится в жидком состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул примерно равна их средней энергии связи: $\bar{E}_k \approx |\bar{E}_p|$ (2).

Упорядоченное расположение молекул в жидкости (*ближний порядок*) наблюдается лишь в пределах двух-трех слоев. Относительные положения молекул в жидкости не фиксированы. *Текучесть жидкости* объясняется тем, что перескоки молекул из одного положения равновесия в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы.

При нагревании жидкости связи между молекулами разрываются. Они начинают двигаться независимо — происходит фазовый переход из жидкого состояния в газообразное.

Вещество находится в газообразном состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул значительно превышает их среднюю энергию связи: $\bar{E}_k \gg |\bar{E}_p|$ (3).

Газы могут неограниченно расширяться в пространстве, так как силы притяжения между молекулами незначительны.

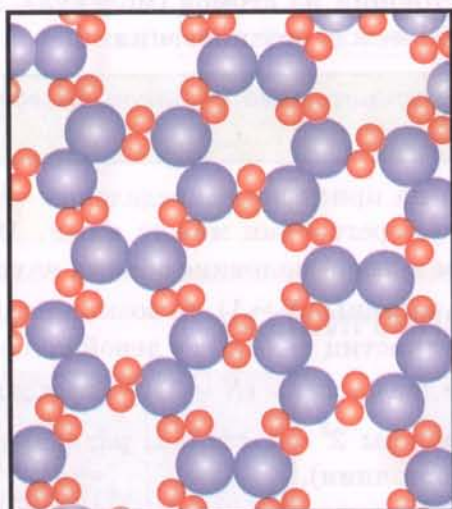
При нагревании газа столкновения атомов могут приводить к их ионизации и образованию нового агрегатного состояния — плазмы. *Ионизация* — процесс образования ионов из атомов.

Плазма — электронейтральная совокупность нейтральных и заряженных частиц.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ

①

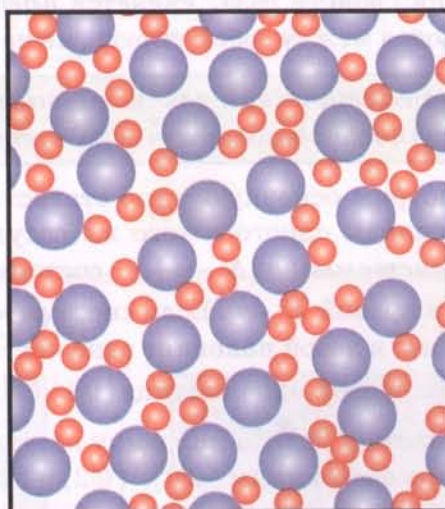
Твердое тело (лед)



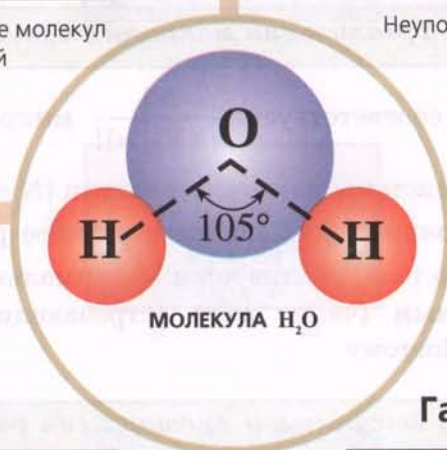
Упорядоченное расположение молекул H_2O в кристаллической решетке льда

②

Жидкость (вода)

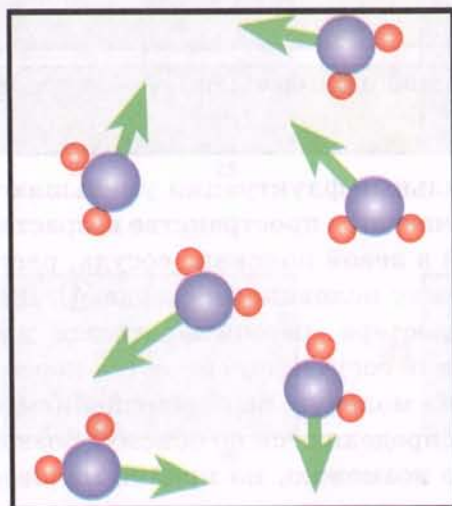


Неупорядоченное расположение молекул H_2O



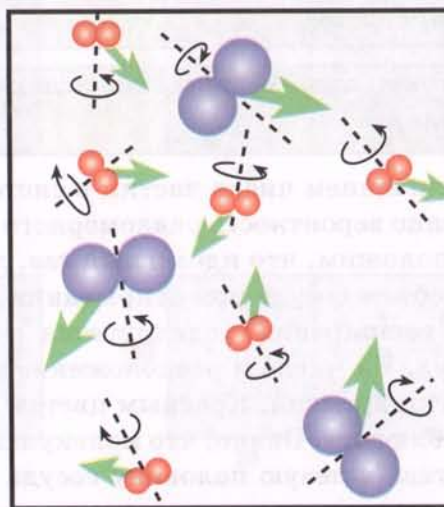
③

Пар (водяной)



Молекулы движутся хаотически

Газ (смесь O_2 и H_2)



Молекулы движутся поступательно и вращаются

§31. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ПРОСТРАНСТВЕ

Любое вещество в земных условиях состоит из огромного числа молекул (1 моль вещества содержит $6,022 \cdot 10^{23}$ частиц). Математическое описание такой системы возможно лишь при рациональном выборе ее физической модели. Наиболее простой моделью, используемой для объяснения свойств газа, является *идеальный газ*, состоящий из атомов (молекул), которые сталкиваются между собой упруго, но не взаимодействуют между столкновениями.

Статистическая закономерность в теории идеального газа — закон поведения совокупности большого числа частиц.

Рассмотрим основную идею статистического метода на примере распределения частиц по двум половинам одного и того же сосуда, не имеющего перегородки между ними. **Макросостояние системы** $\langle n | N - n \rangle$ — состояние, при котором в левой половине объема находится n частиц, а в правой $N - n$. Если система состоит из одной частицы ($N = 1$), то возможны два макросостояния: в левой половине одна частица, в правой нет частиц — $\langle 1|0 \rangle$; в левой половине нет частиц — в правой одна частица $\langle 0|1 \rangle$ ①. Если в системе две частицы ($N = 2$) ②, каждая из них может попасть в любую половину сосуда. Поэтому возможны $2^2 = 4$ способа размещения частиц по макросостояниям $\langle 2|0 \rangle$, $\langle 0|2 \rangle$ и $\langle 1|1 \rangle$ (два микросостояния).

Микросостояние — способ реализации макросостояния системы.

Макросостоянию $\langle n | N - n \rangle$ соответствует $\frac{N!}{n!(N-n)!}$ микросостояний,

где $N! = N(N-1)(N-2)\dots 1$. Для системы из четырех частиц ($N = 4$) возможны $2^4 = 16$ микросостояний системы ③. Макросостояние $\langle 2|2 \rangle$, соответствующее равномерному распределению в пространстве молекул идеального газа, реализуется максимальным числом способов (шестью), т.е. является наиболее вероятным (чаще всего встречающимся) среди всех возможных: $\langle 4|0 \rangle$, $\langle 3|1 \rangle$, $\langle 2|2 \rangle$, $\langle 1|3 \rangle$, $\langle 0|4 \rangle$. Поэтому

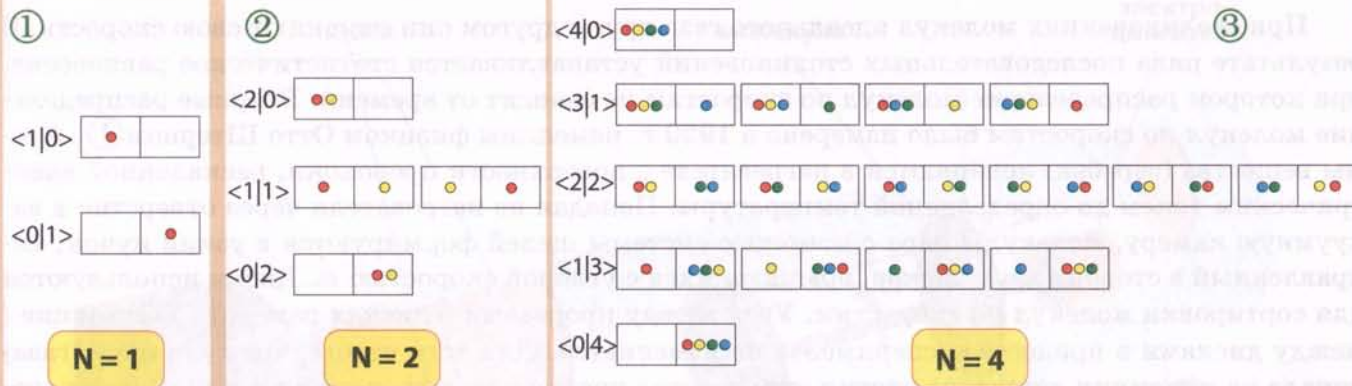
молекулы идеального газа в отсутствие внешних сил равномерно распределены в пространстве.

Флуктуации — случайные отклонения физической величины от своего среднего значения.

С увеличением числа частиц в системе их относительные флуктуации уменьшаются. Соответственно вероятность равномерного распределения частиц в пространстве возрастает.

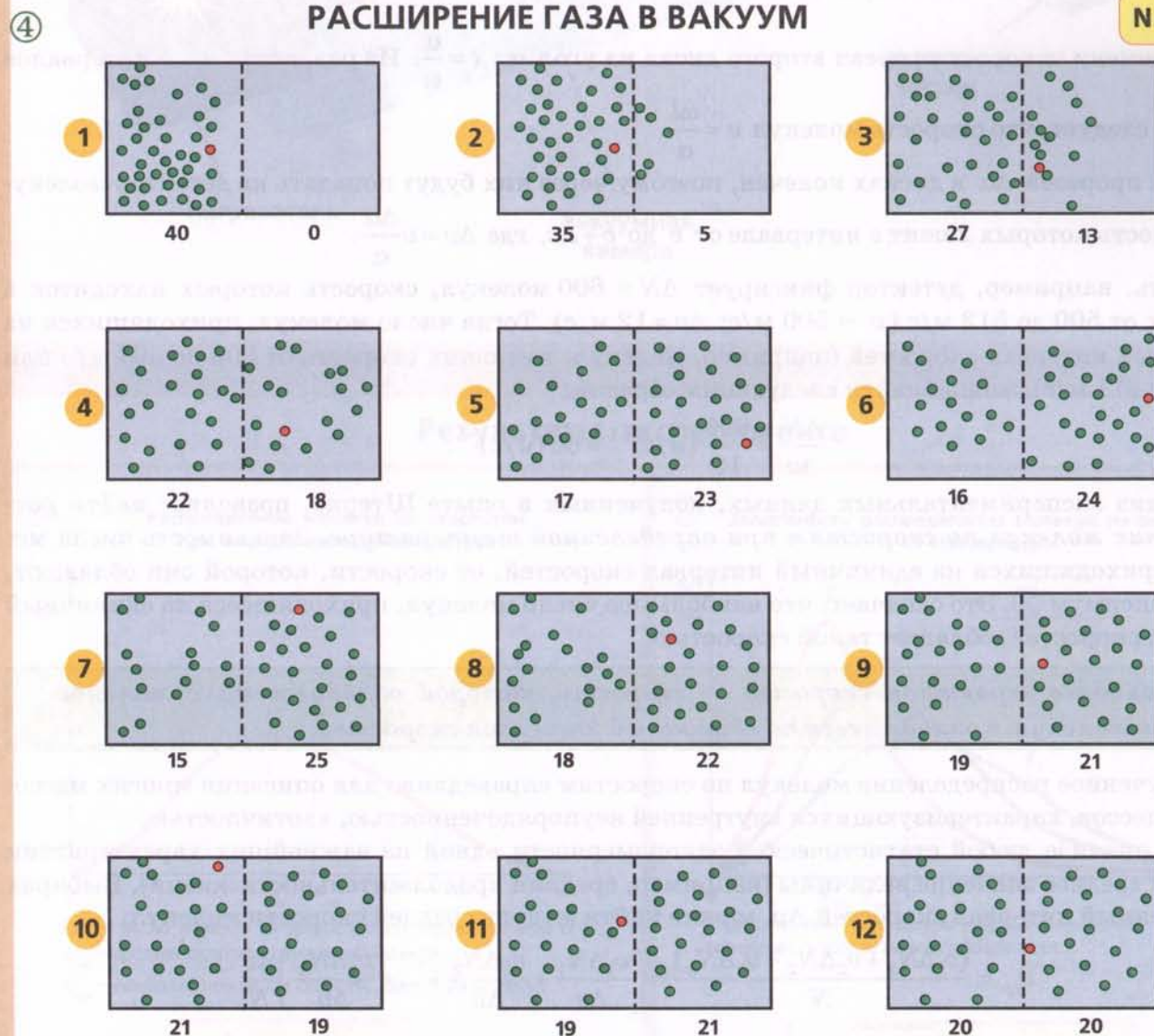
Предположим, что идеальный газ, локализованный в левой половине сосуда, расширяется в весь объем сосуда при открывании перегородки между половинами сосуда ④. Динамика процесса расширения моделируется с помощью компьютера, рассчитывающего движение 40 молекул. Их число и расположение в каждой половине сосуда фиксируются через равные промежутки времени. Красным цветом отмечена одна из молекул, за перемещением которой можно наблюдать. Видно, что молекулы равномерно распределяются по объему. Возвращение молекул газа в левую половину сосуда принципиально возможно, но крайне маловероятно. Если бы компьютер выдавал по одной картинке в секунду, то для возвращения всех 40 молекул в левую половину сосуда потребовалось бы 100 000 лет. С увеличением числа частиц это время резко возрастает.

Возможное распределение N - частиц идеального газа по двум половинам сосуда, не разделенного перегородкой



РАСШИРЕНИЕ ГАЗА В ВАКУУМ

N = 40



Молекулы газа постепенно равномерно распределяются по объему. Устанавливается динамическое равновесие между частями газа по обе стороны проницаемой перегородки. Число молекул и их положение в каждой половине сосуда фиксируются через равные промежутки времени. Красным цветом выделена одна из молекул

§32. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ. ОПЫТ ШТЕРНА

При столкновениях молекул идеального газа друг с другом они изменяют свою скорость. В результате ряда последовательных столкновений устанавливается статистическое равновесие, при котором распределение молекул по скоростям не зависит от времени. Впервые распределение молекул по скоростям было измерено в 1920 г. немецким физиком Отто Штерном^①. Атомы вещества (серебра) испаряются в нагревателе с поверхности проволоки, раскаленной электрическим током до определенной температуры. Попадая из нагревателя через отверстие в вакуумную камеру, молекулы пара с помощью системы щелей формируются в узкий пучок, направленный в сторону двух дисков, вращающихся с угловой скоростью ω . Диски используются для сортировки молекул по скоростям. Угол между прорезями в дисках равен α . Расстояние l между дисками в процессе эксперимента не изменяется. Для того чтобы молекула пара (газа) попала на приемник детектора частиц, она должна пройти через прорезы в дисках. Значит время $t = \frac{l}{v}$ прохождения молекулы, движущейся со скоростью v между дисками, должно быть

равно времени поворота прорези второго диска на угол α : $t = \frac{\alpha}{\omega}$. Из равенства этих интервалов времени следует, что скорость молекул $v = \frac{\omega l}{\alpha}$.

Угол прорезей $\Delta\alpha$ в дисках конечен, поэтому через них будут попадать на детектор молекулы, скорость которых лежит в интервале от v до $v + \Delta v$, где $\Delta v = v \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$.

Пусть, например, детектор фиксирует $\Delta N = 600$ молекул, скорость которых находится в пределах от 500 до 512 м/с ($v = 500$ м/с; $\Delta v = 12$ м/с). Тогда число молекул, приходящихся на единичный интервал скоростей (например, молекул, имеющих скорость от 506 до 507 м/с или от 510 до 511 м/с), можно найти следующим образом:

$$\frac{\Delta N}{\Delta v} = \frac{600}{12} (\text{м/с})^{-1} = 50 (\text{м/с})^{-1}.$$

Анализ экспериментальных данных, полученных в опыте Штерна, позволяет найти **распределение молекул по скоростям при определенной температуре**. Зависимость числа молекул, приходящихся на единичный интервал скоростей, от скорости, которой они обладают, имеет максимум^②. Это означает, что наибольшее число молекул, приходящееся на единичный интервал скоростей, обладает такой скоростью.

Наиболее вероятная скорость — скорость, которой обладает максимальное число молекул, приходящееся на единичный интервал скоростей.

Полученное распределение молекул по скоростям справедливо для описания многих массовых процессов, характеризующихся внутренней неупорядоченностью, хаотичностью.

При анализе любой статистической закономерности одной из важнейших характеристик является среднее значение величины (например, средняя продолжительность жизни). Выбирая определенный интервал скоростей Δv , можно найти модуль средней скорости молекул:

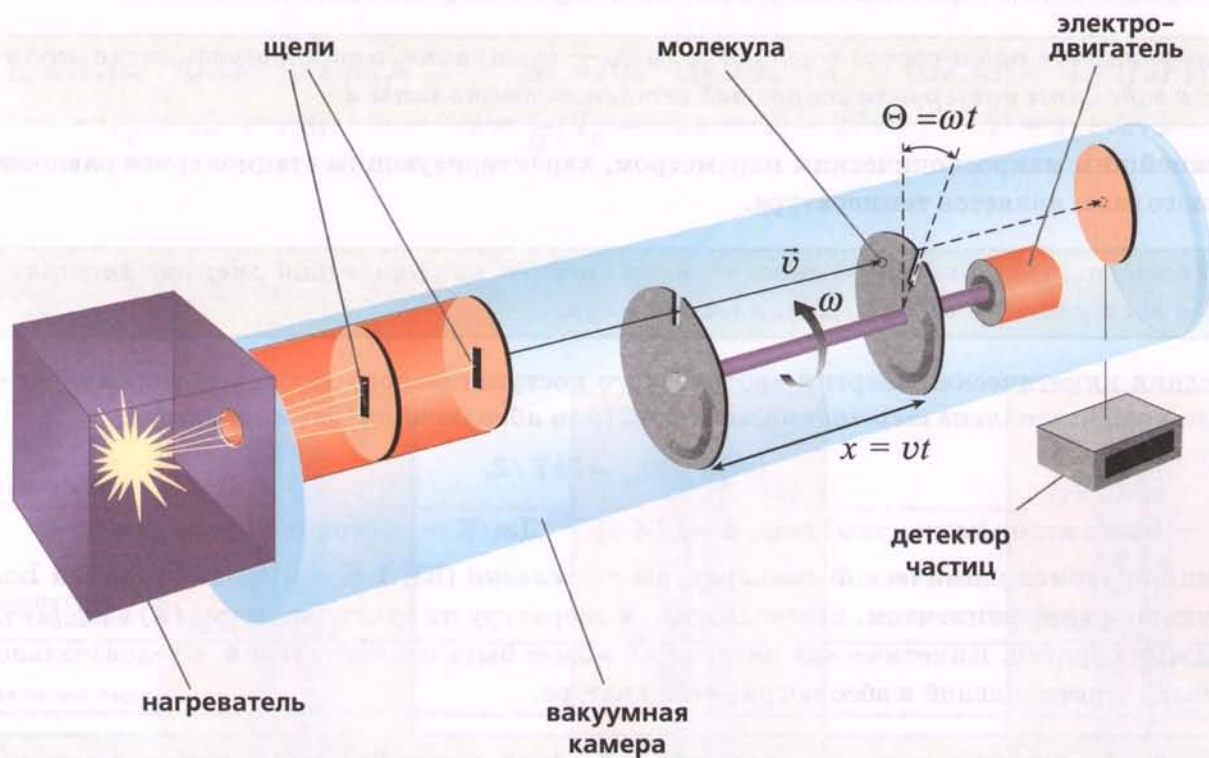
$$v_{\text{ср}} = \frac{(v_1 \Delta N_1 + v_2 \Delta N_2 + v_k \Delta N_k)}{N} = \left(\frac{v_1 \Delta N_1}{\Delta v} + \frac{v_2 \Delta N_2}{\Delta v} + \dots + \frac{v_k \Delta N_k}{\Delta v} \right) \frac{\Delta v}{N}$$

Вычисления показывают, что средняя скорость молекул превышает наиболее вероятную: $v_{\text{ср}} > v_{\text{н.в.}}$. С увеличением температуры средняя и наиболее вероятная скорости молекул возрастают^③. Можно показать, что $(m_a v^2 / 2)_{\text{ср}} = 3kT / 2$.

ОПЫТ ШТЕРНА

①

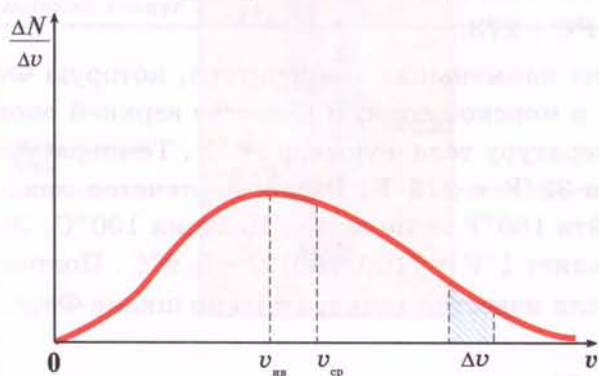
ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО СКОРОСТЯМ



Результаты эксперимента

②

Распределение молекул по скоростям при определенной температуре

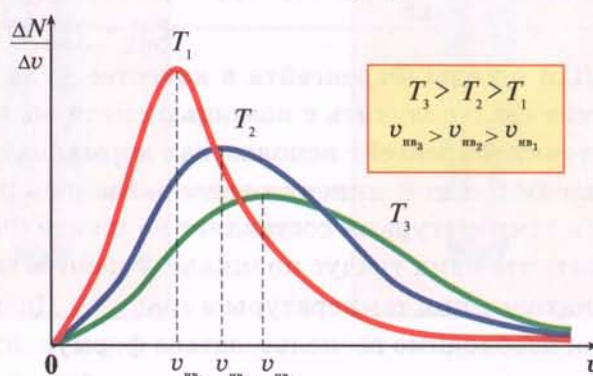


ΔN – число молекул со скоростью в интервале от v до $v + \Delta v$
 $v_{ср}$ – средняя скорость движения молекул
 $v_{нв}$ – наиболее вероятная скорость движения молекул

$$v = \omega \frac{x}{\theta}$$

③

Зависимость распределения молекул по скоростям от температуры



С увеличением температуры средняя и наиболее вероятная скорости молекул возрастают

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

§33. ШКАЛЫ ТЕМПЕРАТУР

В результате многократных столкновений между молекулами устанавливается

стационарное равновесное состояние газа — состояние, при котором число молекул в заданном интервале скоростей остается постоянным.

Важнейшим макроскопическим параметром, характеризующим стационарное равновесное идеального газа, является температура.

Температура идеального газа — мера средней кинетической энергии хаотического поступательного движения его молекул.

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекул идеального газа пропорциональна *термодинамической (или абсолютной) температуре*:

$$(m_a v^2 / 2)_{\text{ср}} = 3kT / 2,$$

где m_a — масса атома (молекулы) газа; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Единица термодинамической температуры — *кельвин (К)*; $1 \text{ К} = 1^\circ\text{С}$. Постоянная Больцмана является коэффициентом, переводящим температуру из градусной меры (К) в энергетическую (Дж) и обратно. Кинетическая энергия не может быть отрицательной. Следовательно, не может быть отрицательной и абсолютная температура.

При абсолютном нуле температуры средняя кинетическая энергия молекул равна нулю — движение молекул прекращается.

Наряду с *абсолютной температурной шкалой* на практике используются другие шкалы температур. Наиболее распространенными температурными шкалами являются *шкала Цельсия* и *шкала Фаренгейта*, отличающиеся друг от друга выбором *реперных* (опорных) *точек*. В шкале Цельсия температура таяния льда принята за 0°С , а температура кипения воды равна 100°С . Абсолютный нуль термодинамической температуры по шкале Кельвина соответствует $(-273,15^\circ\text{С})$. Связь температур по шкале Цельсия и Кельвина определяется соотношениями:

$$t^\circ\text{С} = T - 273; T = t^\circ\text{С} + 273.$$

Для шкалы Фаренгейта в качестве нуля выбрана наименьшая температура, которую Фаренгейт смог получить с помощью смеси воды, льда и морской соли. В качестве верхней опорной точки Фаренгейт использовал нормальную температуру тела человека 96°F . Температуры плавления льда и кипения воды оказались равными 32°F и 212°F . Разность отсчетов между этими температурами составляет по шкале Фаренгейта 180°F , а по шкале Цельсия 100°С . Это значит, что один градус по шкале Фаренгейта составляет $1^\circ\text{F} = (100/180)^\circ\text{С} = 5/9^\circ\text{С}$. Поэтому для нахождения температуры в градусах Цельсия, если известна температура по шкале Фаренгейта, необходимо воспользоваться формулой:

$$t^\circ\text{С} = 5/9 (T_F - 32).$$

Соответственно, зная температуру в градусах Цельсия, можно найти температуру по шкале Фаренгейта:

$$T_F = 32 + 1,8t.$$

Явление расширения веществ при увеличении температуры используется в газовых и жидкостных термометрах. В температурных индикаторах цвет жидких кристаллов оказывается различным при разной температуре.

ШКАЛА ФАРЕНГЕЙТА

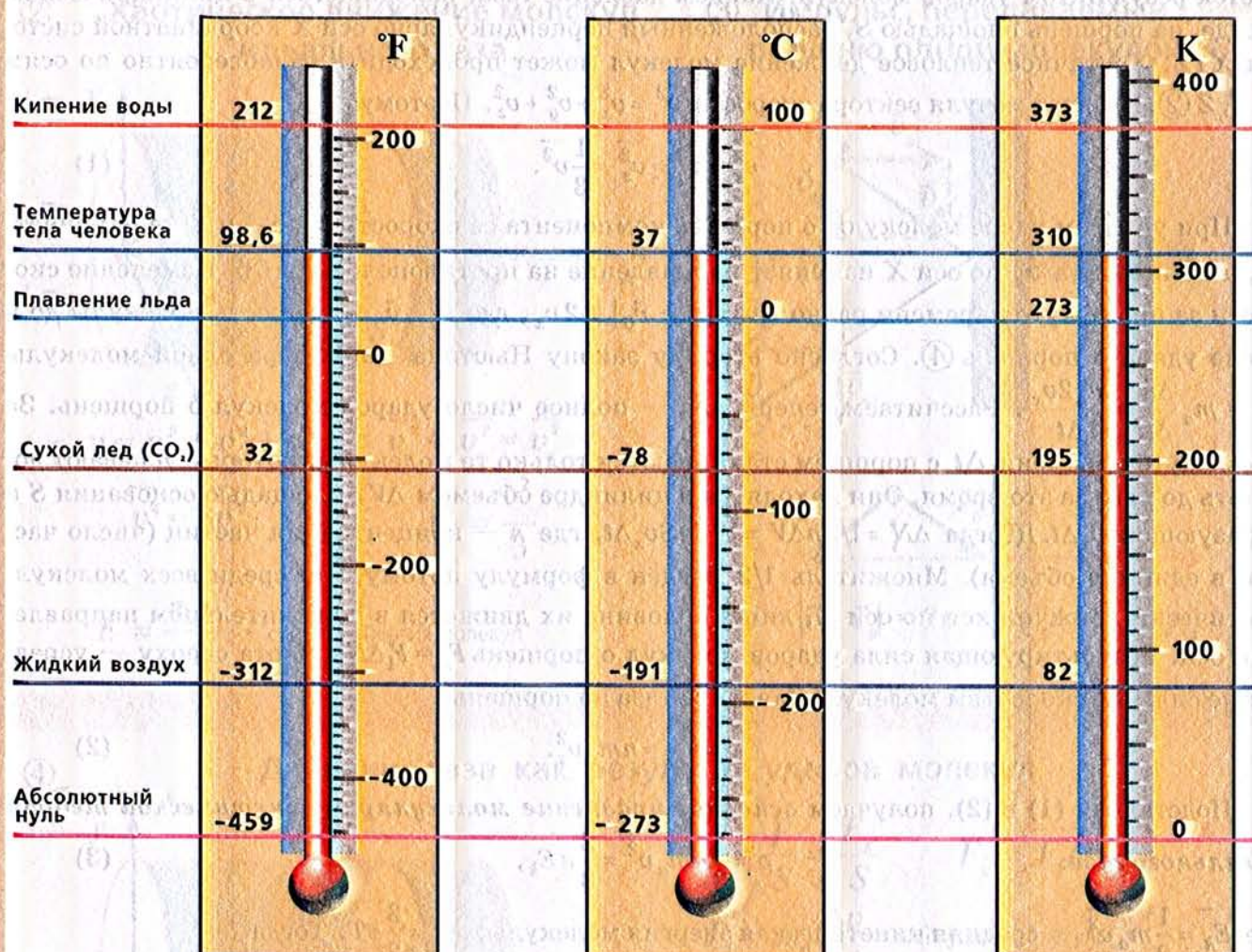
$$T_F = 32 + 1,8t$$

ШКАЛА ЦЕЛЬСИЯ

$$t = \frac{5}{9}(T_F - 32) = T - 273$$

ШКАЛА КЕЛЬВИНА

$$T = t + 273$$



§34. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Состояние данной массы газа характеризуется такими макроскопическими параметрами, как его объем V , давление p , температура T . Наиболее просто **уравнение состояния**, связывающее эти параметры, можно получить для идеального газа. Подобную модель ^① можно использовать при выполнении следующих

условий идеальности газа:

- 1) Диаметр молекул газа много меньше среднего расстояния между ними: $D \ll l$,
- 2) Средняя кинетическая энергия молекул много больше их средней энергии связи

$E_k \gg |E_p|$. Молекулы взаимодействуют друг с другом и со стенками упруго. Давление газа является результатом ударов молекул. Найдем давление газа, находящегося в цилиндрическом сосуде, на поршень площадью S , расположенный перпендикулярно оси X координатной системы XYZ . Хаотичное тепловое движение молекул может происходить равновероятно по осям X, Y, Z ^②. Квадрат модуля вектора скорости $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. Поэтому

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}. \quad (1)$$

При упругом ударе молекулы о поршень компонента ее скорости v_y по оси Y не изменяется, а компонента v_x по оси X изменяет направление на противоположное ^③. Изменение скорости за промежуток времени равно $\Delta v = |\vec{v} - \vec{v}_0| = 2v_x$, где $\vec{v}_0, \vec{v}$ — скорость молекулы до и после удара о поршень ^④. Согласно второму закону Ньютона сила удара одной молекулы $F_1 = m_a \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{m_a 2v_x}{\Delta t}$. Рассчитаем теперь ΔN — полное число ударов молекул о поршень. За промежуток времени Δt с поршнем сталкиваются только те молекулы, которые успевают долететь до него за это время. Они находятся в цилиндре объемом ΔV , площадью основания S и образующей $v_x \Delta t$. Тогда $\Delta N = 1/2 n \Delta V = 1/2 n S v_x \Delta t$, где n — концентрация частиц (число частиц в единице объема). Множитель $1/2$ введен в формулу потому, что среди всех молекул, хаотически движущихся по оси X , лишь половина их движется в положительном направлении оси. Результирующая сила ударов молекул о поршень $F_x = \overline{F_1} \Delta N$. Черта сверху — усреднение силы по скоростям молекул. Давление газа на поршень

$$p = \frac{F_x}{S} = n m_a \overline{v_x^2}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получаем **основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа:**

$$p = \frac{1}{3} n m_a \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \overline{E_k}, \quad (3)$$

где $\overline{E_k} = \frac{1}{2} m_a \overline{v^2}$ — средняя кинетическая энергия молекулы: $\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$. Тогда

$$p = nkT. \quad (4)$$

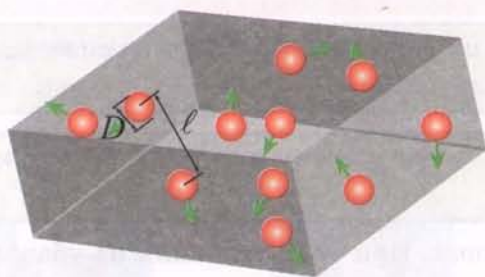
Учитывая, что $n = \frac{N}{V}$, $N = \frac{m}{m_a}$, $m_a = \frac{M}{N_a}$, $N_A = \frac{R}{k}$, получаем

уравнение Клапейрона — Менделеева — уравнение состояния идеального газа, связывающего три макроскопических параметра (давление, объем и температуру) газа данной массы:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (5)$$

①

УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОСТИ ГАЗА



$$D \ll \ell$$

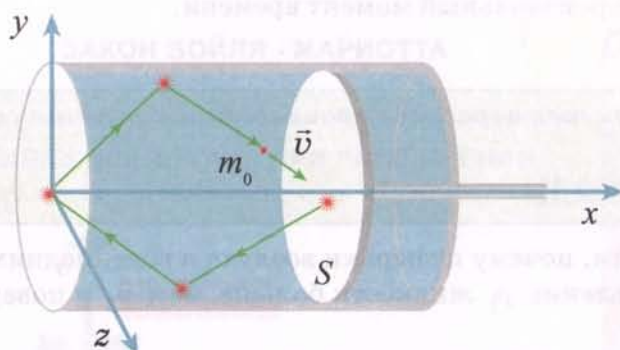
диаметр молекул много меньше
среднего расстояния между частицами

$$E_k \gg E_p$$

кинетическая энергия молекул
много больше их средней энергии связи.
Молекулы взаимодействуют друг с другом
и со стенками лишь при упругом столкновении

②

Хаотическое движение молекул идеального газа



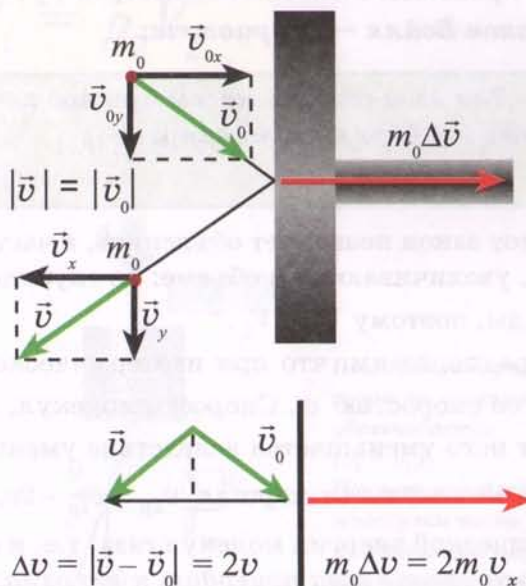
$$v = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2} \quad v_x^2 = \frac{v^2}{3}$$

$$\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \text{ — средняя энергия молекул}$$

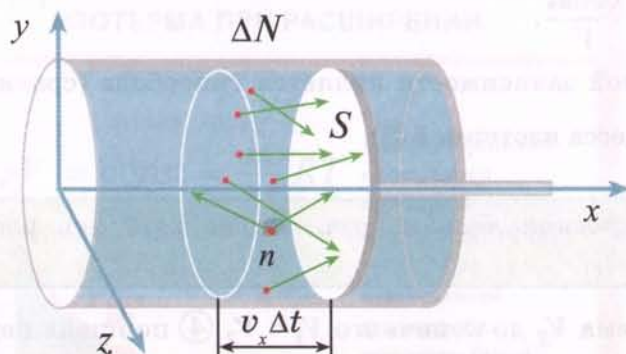
③

Импульс, передаваемый поршню одной молекулой



④

Давление газа как результат ударов молекул



$$p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{F_x}{S} \quad F_x = \overline{F_1 \Delta N}$$

$$F_1 = m_0 \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ — сила удара молекулы}$$

$$N = \frac{1}{2} n S v_x \Delta t \text{ — число ударов о поршень}$$

В силу хаотичности в положительном направлении
оси x движется половина молекул, имеющих
концентрацию n

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$$

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$$

$$p = \frac{1}{2} \frac{n S v_x \Delta t \cdot 2 m_0 v_x}{S \Delta t} = n m_0 \overline{v_x^2}$$

§35. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. ЗАКОН БОЙЛЯ — МАРИОТТА

Изопроцесс — процесс, при котором один из макроскопических параметров состояния данной массы газа остается постоянным.

Изотермический процесс — процесс изменения состояния газа определенной массы при постоянной температуре.

При изотермическом процессе $T = \text{const}$, $m = \text{const}$. При этих условиях из уравнения Клапейрона — Менделеева следует закон Бойля-Мариотта:

$$pV = \text{const} = \frac{m}{M}RT. \quad (1)$$

Это означает, что произведение начального давления газа p_1 на его начальный объем V_1 равно произведению этих параметров p_2 , V_2 в произвольный момент времени.

Закон Бойля — Мариотта:

Для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объем постоянно:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Этот закон позволяет объяснить, в частности, почему пузырьки воздуха в воде, поднимаясь вверх, увеличиваются в объеме: на глубине давление p_1 жидкости больше, чем p_2 у поверхности воды, поэтому $V_2 > V_1$.

Предположим, что при изотермическом расширении газа ($V_2 > V_1$) ① поршень движется вверх со скоростью v . Скорость молекул, догоняющих поршень со скоростью v_1 , при отражении от него уменьшается вследствие уменьшения проекции скорости v_y на ось Y . После отражения молекулы от поршня $v_{2y} = v_{1y} - 2v$, $v_{2x} = v_{1x}$ ②. Это приводит к уменьшению средней кинетической энергии молекул газа, т.е. к его охлаждению.

Расширение газа приводит к его охлаждению. Для поддержания постоянной температуры газа (при изотермическом расширении) к нему необходимо подводить определенное количество теплоты Q .

Давление газа при изотермическом процессе, как следует из закона Бойля — Мариотта (1), обратно пропорционально его объему:

$$p = \frac{\text{const}}{V}.$$

Графиком такой обратно пропорциональной зависимости является гипербола (сравните с $y = \frac{C}{x}$), называемая для изотермического процесса изотермой ③.

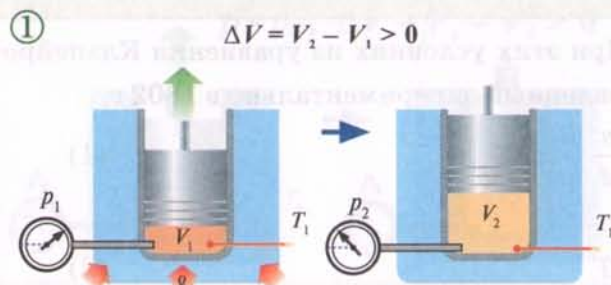
Изотерма — график изменения макроскопических параметров газа при изотермическом процессе.

При сжатии газа от первоначального объема V_2 до конечного $V_1 < V_2$ ④ поршень передает молекулам газа часть своей кинетической энергии, в результате чего газ нагревается ⑤. Сжатие газа приводит к его нагреванию. Для поддержания постоянной температуры газа (при изотермическом сжатии) от него необходимо отводить определенное количество теплоты Q ⑥.

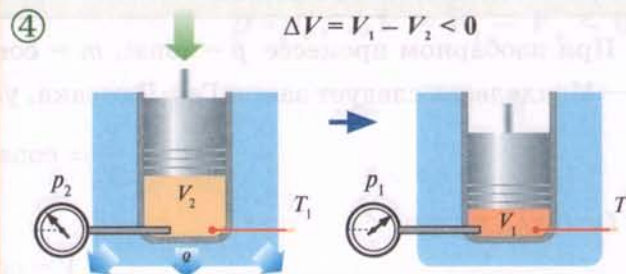
ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

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

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА ($Q > 0$)



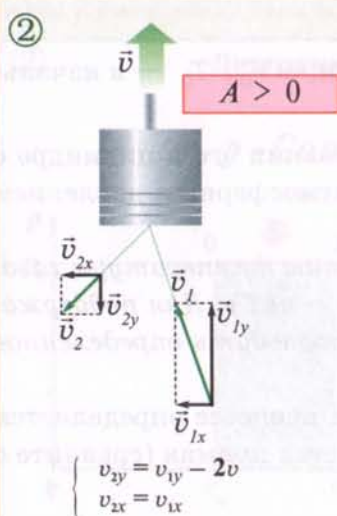
СЖАТИЕ ГАЗА ($Q < 0$)



ЗАКОН БОЙЛЯ - МАРИОТТА

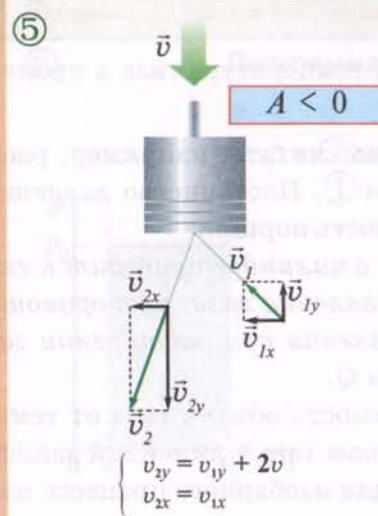
$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ПРИ РАСШИРЕНИИ



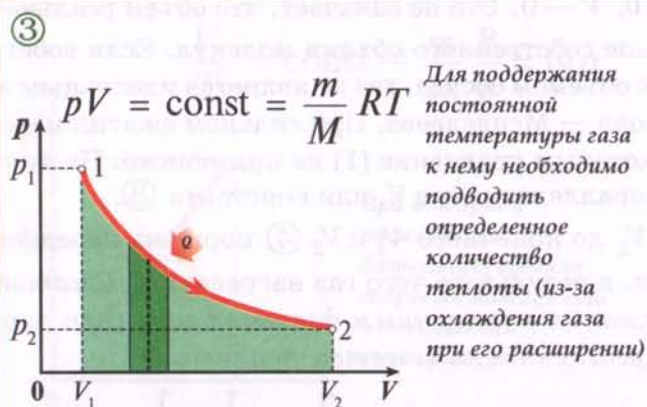
Скорость молекул, догоняющих поршень, уменьшается после удара ($v_2 < v_1$). Это приводит к уменьшению средней кинетической энергии молекул газа, т.е. к его охлаждению

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА ПРИ СЖАТИИ

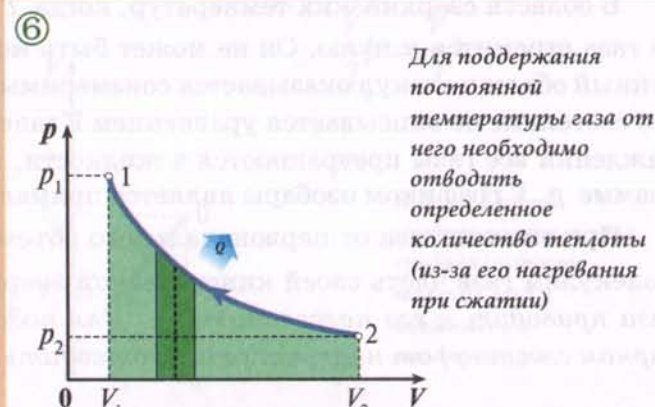


После удара поршня скорость молекул увеличивается ($v_2 > v_1$). Поршень передает молекулам часть своей кинетической энергии, в результате чего газ нагревается

ИЗОТЕРМА ПРИ РАСШИРЕНИИ



ИЗОТЕРМА ПРИ СЖАТИИ



§36. ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА

Изобарный процесс — процесс изменения состояния газа определенной массы при постоянном давлении.

При изобарном процессе $p = \text{const}$, $m = \text{const}$. При этих условиях из уравнения Клапейрона — Менделеева следует закон Гей-Люссака, установленный экспериментально в 1802 г.:

$$\frac{V}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \frac{R}{p}, \quad (1)$$

Откуда

$$V = \text{const} \cdot T \quad (2)$$

Это означает, что объем газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционален термодинамической температуре.

Закон Гей-Люссака:

Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объема газа к его термодинамической температуре постоянно:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0},$$

где V , T — объем и температура газа в произвольный момент времени, а V_0 , T_0 — в начальный момент времени.

Изобарным можно считать, например, расширение газа при нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем ①. Постоянство давления газа обеспечивается атмосферным давлением на внешнюю поверхность поршня.

Расширение газа в цилиндре приводит к его охлаждению: уменьшению температуры газа, а следовательно, и давления газа, пропорционального температуре ($p = nkT$). Для поддержания постоянного давления при расширении газа к нему необходимо подводить определенное количество теплоты Q .

Линейная зависимость объема газа от температуры при изобарном процессе определяется формулой (2). Графиком такой линейной зависимости в осях V , T является прямая (сравните с $y = kx$), называемая для изобарного процесса изобарой ②.

Изобара — график изменения макроскопических параметров газа при изобарном процессе.

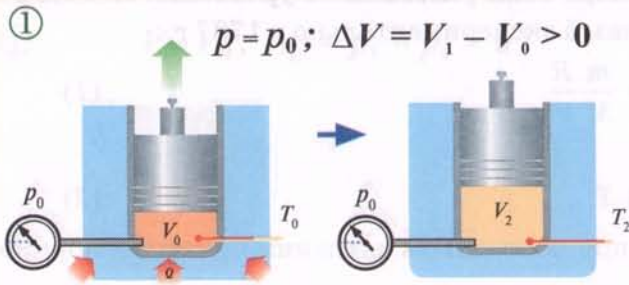
В области сверхнизких температур, когда $T \rightarrow 0$, $V \rightarrow 0$. Это не означает, что объем реального газа стремится к нулю. Он не может быть меньше собственного объема молекул. Если собственный объем молекул оказывается соизмеримым с объемом сосуда, газ не является идеальным и его состояние не описывается уравнением Клапейрона — Менделеева. При сильном сжатии и охлаждении все газы превращаются в жидкости, к которым уравнение (1) не применимо. На диаграмме p , V графиком изобары является прямая, параллельная оси V , или константа ③.

При сжатии газа от первоначального объема V_2 до конечного $V_1 < V_2$ ④ поршень передает молекулам газа часть своей кинетической энергии, в результате чего газ нагревается. Сжатие газа приводит к его нагреванию ⑤. Для поддержания постоянным давления газа (при изобарном сжатии) от него необходимо отводить определенное количество теплоты Q ⑥.

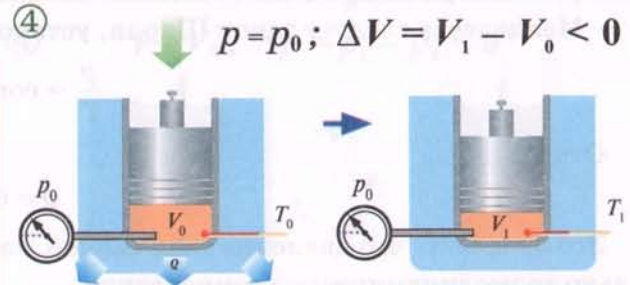
ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

($p = \text{const}$, $m = \text{const}$)

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА ($Q > 0$)



СЖАТИЕ ГАЗА ($Q < 0$)



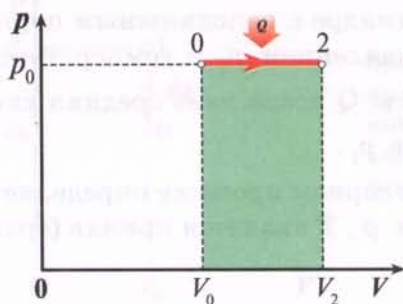
ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$$

ИЗОБАРА ПРИ РАСШИРЕНИИ

② Диаграмма (p, T)

$$p = \text{Const} = p_0$$

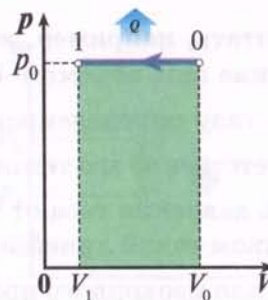


При изобарном расширении к газу подводится количество теплоты Q

ИЗОБАРА ГАЗА ПРИ СЖАТИИ

⑤ Диаграмма (p, T)

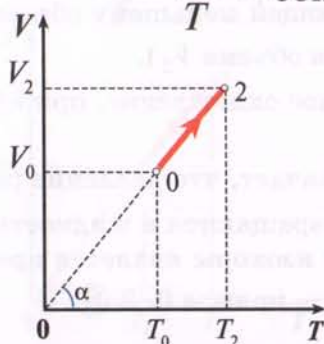
$$p = \text{Const} = p_0$$



При изобарном сжатии от газа отводится количество теплоты Q

③ Диаграмма (V, T)

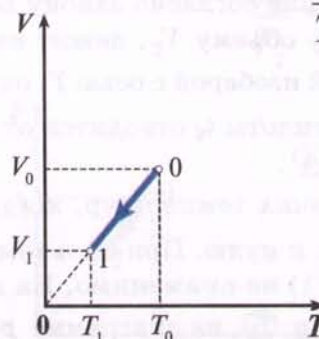
$$\frac{V}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \frac{R}{p} = \text{tg } \alpha$$



При изобарном расширении возрастает средняя скорость молекул газа и повышается температура

⑥ Диаграмма (V, T)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_0}{T_0}$$



При изобарном сжатии уменьшается средняя скорость молекул газа и понижается температура

§37. ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС. ЗАКОН ШАРЛЯ

Изохорный процесс — процесс изменения состояния газа определенной массы при постоянном объеме.

При изохорном процессе $V = \text{const}$, $m = \text{const}$. При этих условиях из уравнения Клапейрона — Менделеева следует закон Шарля, установленный экспериментально в 1787 г.:

$$\frac{p}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \frac{R}{V} \quad (1)$$

Откуда,

$$p = \text{const} \cdot T \quad (2)$$

Это означает, что давление газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционально термодинамической температуре.

Закон Шарля:

Для газа данной массы при постоянном объеме отношение давления газа к его термодинамической температуре постоянно:

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0},$$

где p , T — давление и температура газа в произвольный момент времени, а p_0 , T_0 — в начальный момент времени.

Увеличение давления газа в электрической лампочке при нагревании ее спирали электрическим током является изохорным процессом, так как расширением колбы лампочки можно пренебречь.

Изохорным можно считать, например, нагревание газа в цилиндре с неподвижным поршнем ①. Начальное состояние газа объемом V_0 характеризуется давлением p_0 и температурой T_0 ②. При подведении к газу определенного количества теплоты Q возрастает средняя скорость молекул газа и соответственно его температура T_1 и давление p_1 .

Линейная зависимость давления газа от температуры при изохорном процессе определяется формулой (2) ③. Графиком такой линейной зависимости в осях p , T является прямая (сравните с $y = kx$), называемая для изохорного процесса изохорой.

Изохора — график изменения макроскопических параметров газа при изохорном процессе.

Разным объемам соответствуют разные изохоры. С ростом объема газа (при постоянной температуре) его давление согласно закону Бойля — Мариотта падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объему V_2 , лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объему V_1 (угол α , образуемый изобарой с осью T , оказывается меньше, чем для объема V_2).

Если количество теплоты Q отводится от газа, реализуется изохорное охлаждение, при котором $p_2 < p_1$, $T_2 < T_1$ ④.

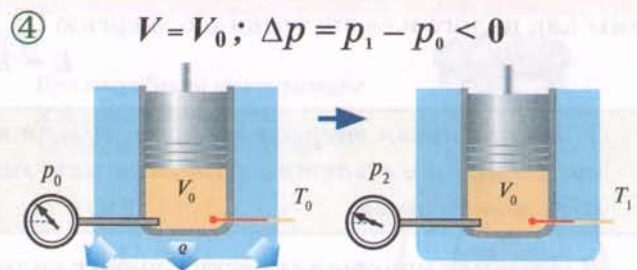
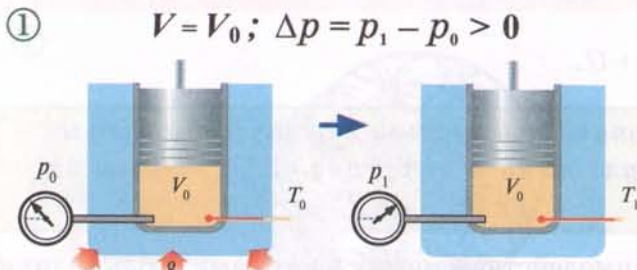
В области сверхнизких температур, когда $T \rightarrow 0$, $p \rightarrow 0$. Это не означает, что давление реального газа стремится к нулю. При сильном охлаждении все газы превращаются в жидкости, к которым уравнение (1) не применимо. На диаграмме p , V графиком изохоры является прямая, параллельная оси p ⑤, на диаграмме p , T изохорное охлаждение — прямая 0–2 ⑥.

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС

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

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА ($Q > 0$)

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ($Q < 0$)



ЗАКОН ШАРЛЯ

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0}$$

ИЗОХОРА ПРИ РАСШИРЕНИИ

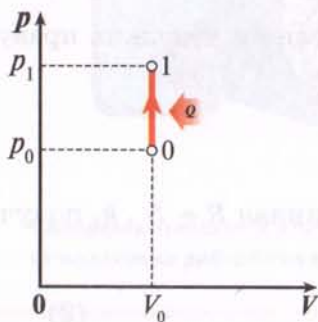
ИЗОХОРА ГАЗА ПРИ СЖАТИИ

② Диаграмма (p, V)

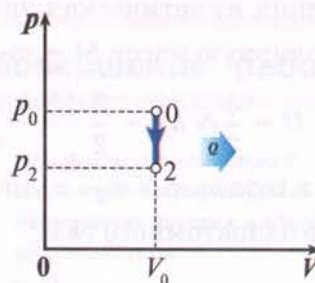
⑤ Диаграмма (p, V)

$V = \text{Const} = V_0$

$V = \text{Const} = V_0$



При изохорном нагревании к газу подводится количество теплоты Q



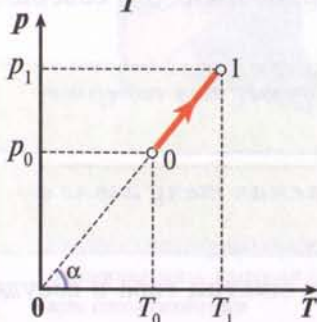
При изохорном охлаждении от газа отводится количество теплоты Q

③ Диаграмма (p, T)

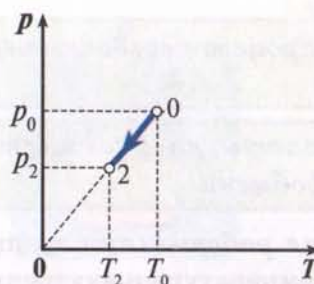
⑥ Диаграмма (p, T)

$$\frac{p}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \frac{R}{V} = \text{tg } \alpha$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_0}{T_0}$$



При изохорном нагревании средняя скорость молекул, температура и давление газа возрастает



При изохорном охлаждении средняя скорость молекул, температура и давление газа уменьшается

§38. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Термодинамика изучает тепловые свойства макроскопических тел, закономерности превращения энергии в физических явлениях различной природы и ее использования для совершения механической работы.

Полная энергия E макроскопической системы включает механическую энергию $E_{\text{мех}}$ системы как целого и ее внутреннюю энергию U :

$$E = E_{\text{мех}} + U.$$

Внутренняя энергия тела — сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов или молекул) тела и потенциальной энергии их взаимодействия.

В твердых кристаллических телах силы взаимодействия между частицами столь велики, что они не позволяют частицам удалиться друг от друга на большое расстояние ①. Молекулы совершают колебания около равновесных положений — узлов кристаллической решетки. **В жидкости** молекулы, колеблясь некоторое время около положения равновесия, время от времени смещается («перескакивает») на расстояние, сравнимое с межмолекулярным расстоянием ②.

В идеальной газе среднее расстояние между молекулами столь велико, что силы межмолекулярного взаимодействия не влияют на движение молекул ③. Можно считать, что молекулы движутся прямолинейно и равномерно между столкновениями друг с другом или со стенками сосуда, в котором находится газ. Потенциальная энергия взаимодействия частиц идеального газа пренебрежимо мала по сравнению с кинетической энергией их теплового движения. Поэтому внутренняя энергия идеального газа определяется кинетической энергией теплового движения всех N частиц газа:

$$U = N \overline{E_k}, \quad (1)$$

где $\overline{E_k} = 3/2 kT$ — средняя кинетическая энергия одного атома. Разделив и умножив правую часть формулы (1) на молярную массу $M = m_a N_A$, имеем

$$U = \frac{3}{2} N kT = \frac{3}{2} \frac{N(m_a N_A)kT}{M} = \frac{3}{2} \frac{(Nm_a)(N_A k)T}{M}.$$

Учитывая, что масса газа $m = N m_a$, а универсальная газовая постоянная $R = N_A k$, получаем внутреннюю энергию одноатомного газа:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (2)$$

Изменение внутренней энергии ΔU равно разности ее конечного U_2 и начального U_1 значений:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$.

Существует два способа изменения внутренней энергии системы: теплообмен ④ и совершение работы ⑤.

Теплообмен — процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы.

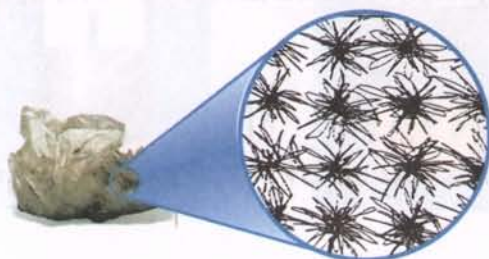
Количество теплоты, получаемое телом, — энергия, передаваемая телу извне в результате теплообмена.

За счет совершения работы (при вращении лопастей в жидкости, сжатии газа в сосуде) может увеличиваться температура и внутренняя энергия системы.

ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ

Твердое тело

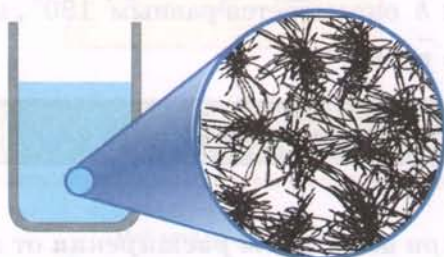
①



Частицы колеблются около положений равновесия, взаимодействуя с ближайшими частицами

Жидкость

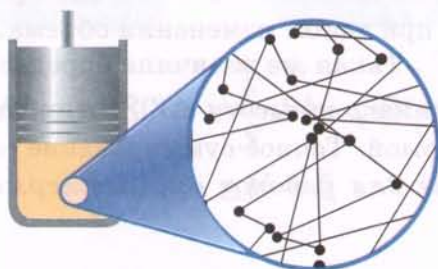
②



Частицы колеблются в большей области, их положения равновесия подвижны

Газ

③



Атомы (молекулы) движутся по прямолинейным траекториям, изменяя направление движения при столкновении

СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ

Теплопередача

④

При нагревании температура и внутренняя энергия жидкости увеличивается

$$\Delta T > 0$$

$$\Delta U > 0$$



Воздух

$$\Delta T > 0$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$$

(двухатомный газ)

При нагревании газа его температура и внутренняя энергия увеличивается

Совершение работы над системой

При вращении лопастей в жидкости температура и внутренняя энергия жидкости увеличивается

$$\Delta T > 0$$

$$\Delta U > 0$$



⑤



Гелий

$$\Delta T > 0$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T > 0$$

(одноатомный газ)

При сжатии газа в сосуде температура и внутренняя энергия газа увеличивается

§39. РАБОТА ГАЗА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Для преобразования внутренней энергии хаотического теплового движения молекул газа в упорядоченное движение другого тела используют поршень в цилиндре, перемещающийся под давлением газа, заполняющего цилиндр. Будем считать, что поршень, площадь поперечного сечения которого равна S , перемещается на высоту h и что сила давления F газа остается постоянной в процессе перемещения. Вычислим работу, совершаемую силой давления газа, при его расширении от начального объема V_1 до конечного V_2 ①:

$$A = Fh \cos 0^\circ = \frac{F}{S} Sh.$$

Так как среднее давление газа $\bar{p} = \frac{F}{S}$, а изменение его объема $\Delta V = V_2 - V_1 = Sh$, то выражение для работы газа можно представить в виде:

$$A = \bar{p} \Delta V = \bar{p} (V_2 - V_1). \quad (1)$$

Работа, совершаемая газом, равна произведению среднего давления газа на изменение его объема.

При расширении ($\Delta V > 0$) газ совершает положительную работу,

отдавая энергию окружающим телам. Внутренняя энергия газа при расширении уменьшается.

При сжатии газа угол между силой $\vec{F}$ и перемещением $\vec{h}$ оказывается равным 180° , поэтому

$$A = Fh \cos 180^\circ = \bar{p} (V_1 - V_2) = \bar{p} \Delta V < 0$$

При сжатии ($V < 0$) работа, совершаемая газом, отрицательна ②.

Внутренняя энергия газа при сжатии увеличивается.

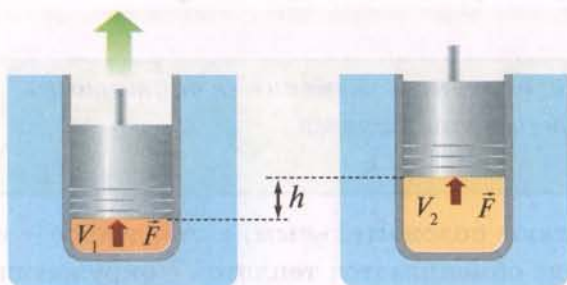
Найдем работу газа при изопроцессах. **Работа газа при изобарном расширении** от начального объема V_1 до конечного V_2 равна площади прямоугольника под изобарой со сторонами p и $(V_2 - V_1)$ ③. **Работа газа при изохорном процессе не совершается:** $A = 0$ ④.

Строго говоря, формулу (1) можно применять лишь при небольшом изменении V объема газа, при котором давление газа изменяется несущественно. При изотермическом расширении газа его давление изменяется по гиперболическому закону ($p = \text{const}/V$) ⑤. Для вычисления работы в этом случае выделим на изотерме небольшой участок, соответствующий малому изменению объема ΔV . Проведем перпендикуляры к оси V из концов участка до пересечения с изотермой и обозначим через p среднее давление газа при таком изменении объема. Работа, совершаемая газом при расширении на ΔV , равна $p \Delta V$. Такая же величина определяет площадь заштрихованной трапеции, имеющей среднюю линию p и высоту ΔV . Из площадей таких трапеций складывается полная площадь под изотермой. Точное суммирование (интегрирование) всей площади под изотермой дает **выражение для работы при изотермическом расширении газа:**

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА ($A > 0$)

① Работа при расширении газа



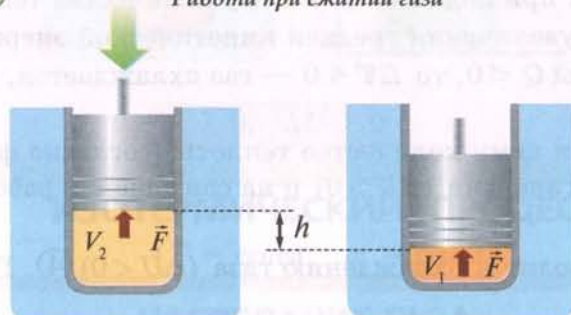
$$A = Fh \cos 0^\circ = \frac{F}{S} Sh = p(V_2 - V_1)$$

$$V_2 - V_1 = \Delta V > 0$$

$$A = \bar{p} \Delta V$$

СЖАТИЕ ГАЗА ($A < 0$)

② Работа при сжатии газа



$$A = Fh \cos 180^\circ = -\frac{F}{S} Sh = p(V_1 - V_2)$$

$$V_1 - V_2 = \Delta V < 0$$

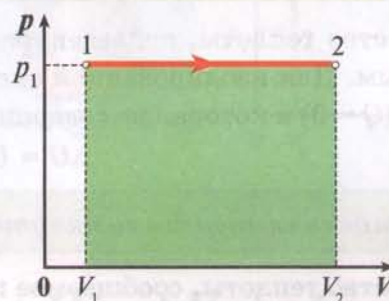
$$A = \bar{p} \Delta V < 0$$

РАБОТА ГАЗА ПРИ ИЗОПРОЦЕССАХ

Изобарный процесс

③ ($p = \text{const}$, $m = \text{const}$)

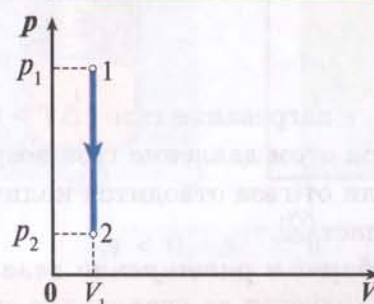
$$A = p(V_2 - V_1)$$



Изохорный процесс

④ ($V = \text{const}$, $m = \text{const}$)

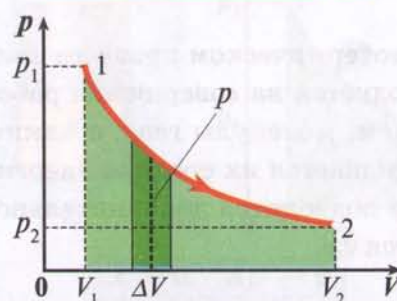
$$A = 0$$



Изотермический процесс

⑤ ($T = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



§40. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики (закон сохранения энергии для тепловых процессов) определяет количественное соотношение между изменением внутренней энергии системы U , количеством теплоты Q , подведенным к ней, и работой A , совершаемой системой против внешних сил:

Количество теплоты, подведенное к системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Количество теплоты, подведенное к системе, считают положительным, а отведенное — отрицательным. Для изолированной системы, которая не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$) и которая не совершает работу против внешних сил ($A = 0$),

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0, \text{ или } U_2 = U_1.$$

Внутренняя энергия замкнутой, изолированной системы сохраняется.

Количество теплоты, сообщаемое газу для изменения его состояния, зависит от способа перехода идеального газа из одного состояния в другое. При разных процессах, связывающих эти состояния газа, количество подведенной (отведенной) теплоты будет различным.

При изохорном процессе объем газа остается постоянным ($\Delta V = 0$), поэтому газ не совершает работу ($A = 0$) ①. Изменение внутренней энергии газа происходит благодаря теплообмену с окружающими телами:

$$Q = \Delta U. \quad (2)$$

Для одноатомного газа первый закон термодинамики (1) имеет вид:

$$Q = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Изохорное нагревание газа ($\Delta T > 0$) происходит при подведении к нему количества теплоты $Q > 0$. При этом давление газа возрастает из-за увеличения средней кинетической энергии молекул. Если от газа отводится количество теплоты $Q < 0$, то $\Delta T < 0$ — газ охлаждается, его давление падает ②.

При изобарном расширении газа подведенное к нему количество теплоты (согласно формуле (1)) расходуется на увеличение его внутренней энергии ($\Delta U > 0$) и на совершение работы газом ($A > 0$) ③.

При изобарном сжатии газа отвод тепла приводит к охлаждению газа ($\Delta U < 0$) ④. При этом $A < 0$.

При изотермическом процессе постоянна температура ($\Delta T = 0$), а внутренняя энергия не изменяется ($\Delta U = 0$). Поэтому первый закон термодинамики для изотермического процесса имеет вид:

$$Q = A. \quad (3)$$

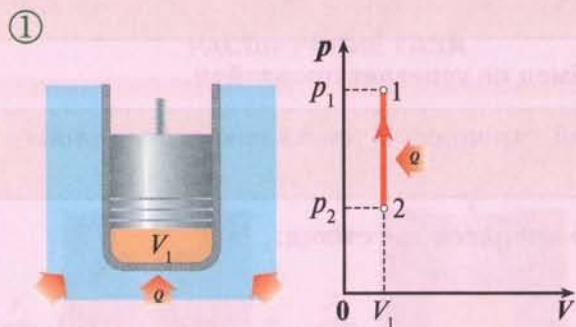
При изотермическом процессе количество теплоты, переданное газу от нагревателя, полностью расходуется на совершение работы ⑤. При расширении газа, находящегося в цилиндре под поршнем, молекулы газа, сталкиваясь с поршнем, уменьшают свою скорость и соответственно уменьшается их средняя энергия. Поэтому для поддержания температуры газа постоянной к нему подводится дополнительное количество теплоты. При изотермическом сжатии тепло отводится ⑥.

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС

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

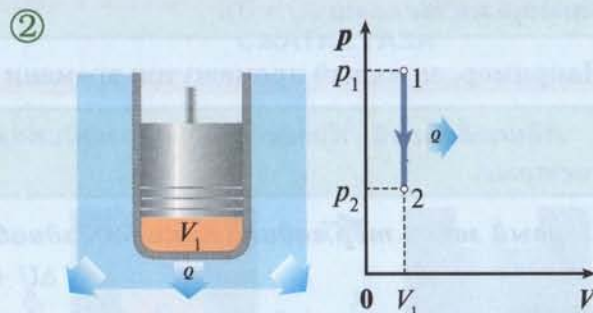
$$Q = \Delta U$$

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА



$$A = 0, \Delta U > 0$$

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА



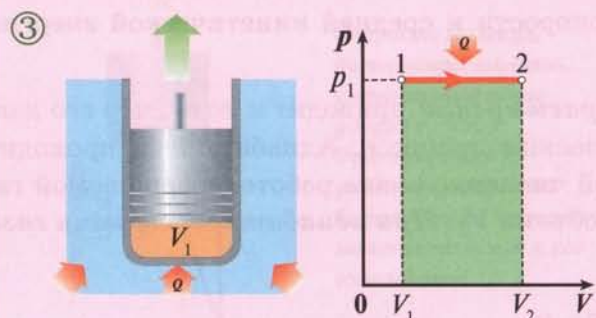
$$A = 0, \Delta U < 0$$

ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

($p = \text{const}$, $m = \text{const}$)

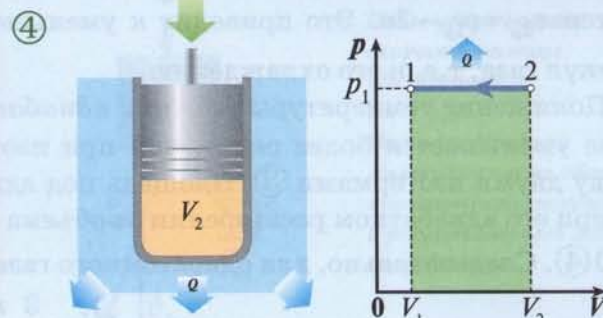
$$Q = \Delta U + A$$

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА



$$A > 0, \Delta U > 0$$

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА



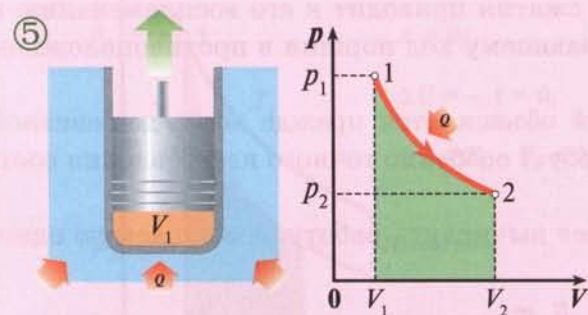
$$A < 0, \Delta U < 0$$

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

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

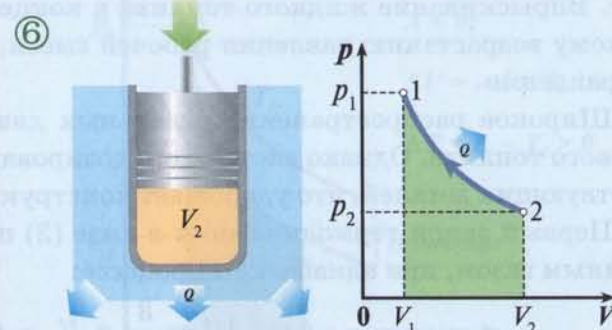
$$Q = A$$

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА



$$A > 0, \Delta U = 0$$

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА



$$A < 0, \Delta U = 0$$

§41. АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Для предотвращения возможных потерь внутренней энергии в результате теплопередачи окружающим телам систему теплоизолируют.

Теплоизолированная система — система, не обменивающаяся энергией с окружающими телами ($Q = 0$).

Например, за малый промежуток времени теплообмен не успевает произойти.

Адиабатный процесс — термодинамический процесс в теплоизолированной системе.

Первый закон термодинамики для адиабатного процесса имеет вид:

$$\Delta U + A = 0, \quad (1)$$

или $A = -\Delta U. \quad (2)$

При адиабатном расширении газа $A > 0$ ①. Следовательно, для одноатомного газа:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T < 0.$$

Это означает, что $\Delta T < 0$, т.е. температура газа уменьшается по сравнению с первоначальной. Физическая причина этого следующая. При адиабатном расширении газа молекулы газа догоняют поршень, движущийся вверх со скоростью v ②. При ударе молекулы о поршень в силу закона сохранения импульса ее скорость по оси X сохраняется: $v_{2x} = v_{1x}$, а по оси Y уменьшается: $v_{2y} = v_{1y} - 2v$. Это приводит к уменьшению скорости и средней кинетической энергии молекул газа, т.е. к его охлаждению.

Понижение температуры газа **при адиабатном расширении** приводит к тому, что его давление уменьшается более резко, чем при изотермическом процессе. Адиабата 1–2, проходит между двумя изотермами ③. Площадь под адиабатой численно равна работе, совершаемой газом при его адиабатном расширении от объема V_1 до объема V_2 . **При адиабатном сжатии газа** $A < 0$ ④. Следовательно, для одноатомного газа:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T > 0.$$

Адиабатное сжатие приводит к повышению температуры газа, так как в результате упругих соударений молекул газа с поршнем их средняя кинетическая энергия возрастает ⑤. Поэтому, например, при быстром сжатии воздуха в цилиндре кусочек ваты, смоченной эфиром, воспламеняется ⑥.

Резкое нагревание воздуха при адиабатном сжатии используется в дизельных двигателях. При сжатии поршнем воздуха, находящегося в цилиндре, его температура значительно возрастает. Впрыскивание жидкого топлива в конце такта сжатия приводит к его воспламенению и резкому возрастанию давления рабочей смеси, вызывающему ход поршня в противоположном направлении.

Широкое распространение дизельных двигателей объясняется прежде всего дешевизной газового топлива. Однако система его дозирования требует особенно точного изготовления соответствующих деталей, что удорожает конструкцию.

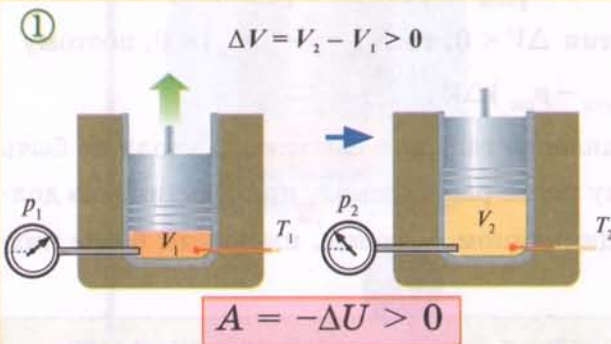
Первый закон термодинамики в виде (2) позволяет вычислить работу, совершаемую одноатомным газом, при адиабатном процессе:

$$A = -\Delta U = \frac{3}{2} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R (T_1 - T_2).$$

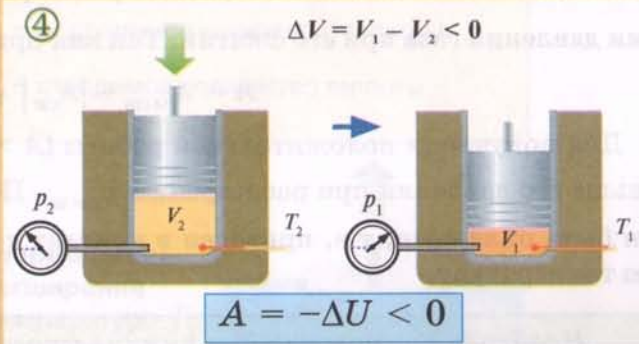
ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННАЯ СИСТЕМА

$$Q = 0$$

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА



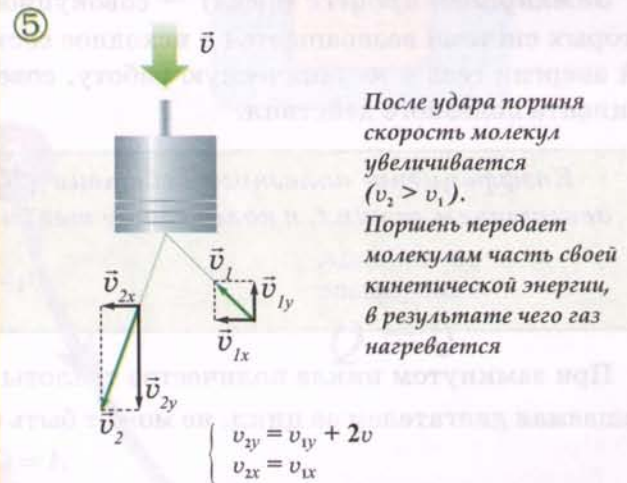
СЖАТИЕ ГАЗА



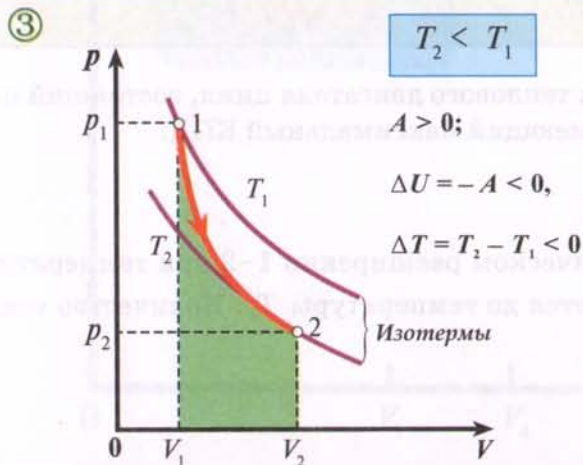
ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ПРИ РАСШИРЕНИИ



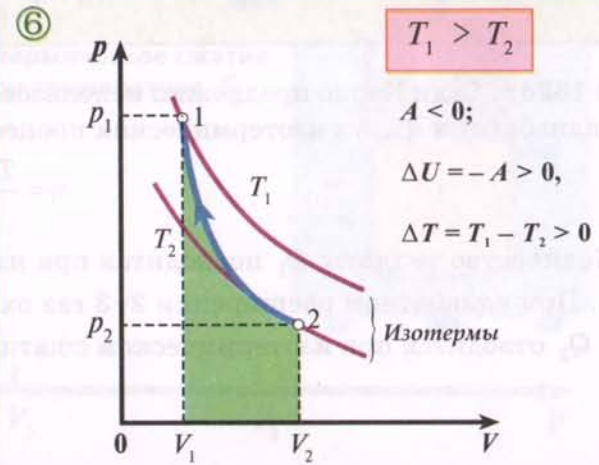
НАГРЕВАНИЕ ГАЗА ПРИ СЖАТИИ



АДИАБАТА ПРИ РАСШИРЕНИИ



АДИАБАТА ПРИ СЖАТИИ



§42. ЦИКЛ КАРНО

Тепловой двигатель — устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Механическая работа в двигателе совершается при расширении рабочего вещества, перемещающего поршень в цилиндре. Для циклической работы двигателя необходимо возвращение поршня в первоначальное положение, т.е. сжатие рабочего вещества. Полная механическая работа A цикла складывается из работы расширения газа $A_{\text{расш}}$ и работы $A_{\text{сж}}$, совершаемой силами давления газа при его сжатии. Так как при сжатии $\Delta V < 0$, то $A_{\text{сж}} = -|A_{\text{сж}}| < 0$, поэтому

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}| = (p_{\text{расш}} - p_{\text{сж}}) \Delta V.$$

Для получения положительной работы ($A > 0$) давление газа при сжатии $p_{\text{сж}}$ должно быть меньше его давления при расширении $p_{\text{расш}}$. Поэтому после расширения, при сжатии, газ должен быть охлажден, т.е. приведен в контакт с холодильником — телом, имеющим более низкую температуру.

Необходимое условие для циклического совершения механической работы в тепловом двигателе — наличие нагревателя и холодильника.

Замкнутый процесс (цикл) — совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние. Эффективность преобразования внутренней энергии газа в механическую работу, совершаемую за цикл, оценивают с помощью коэффициента полезного действия.

Коэффициент полезного действия (КПД) — отношение работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты Q_1 , полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}.$$

При замкнутом цикле количество теплоты Q_2 отдается холодильнику. Поэтому работа, совершаемая двигателем за цикл, не может быть больше

$$A = Q_1 - Q_2.$$

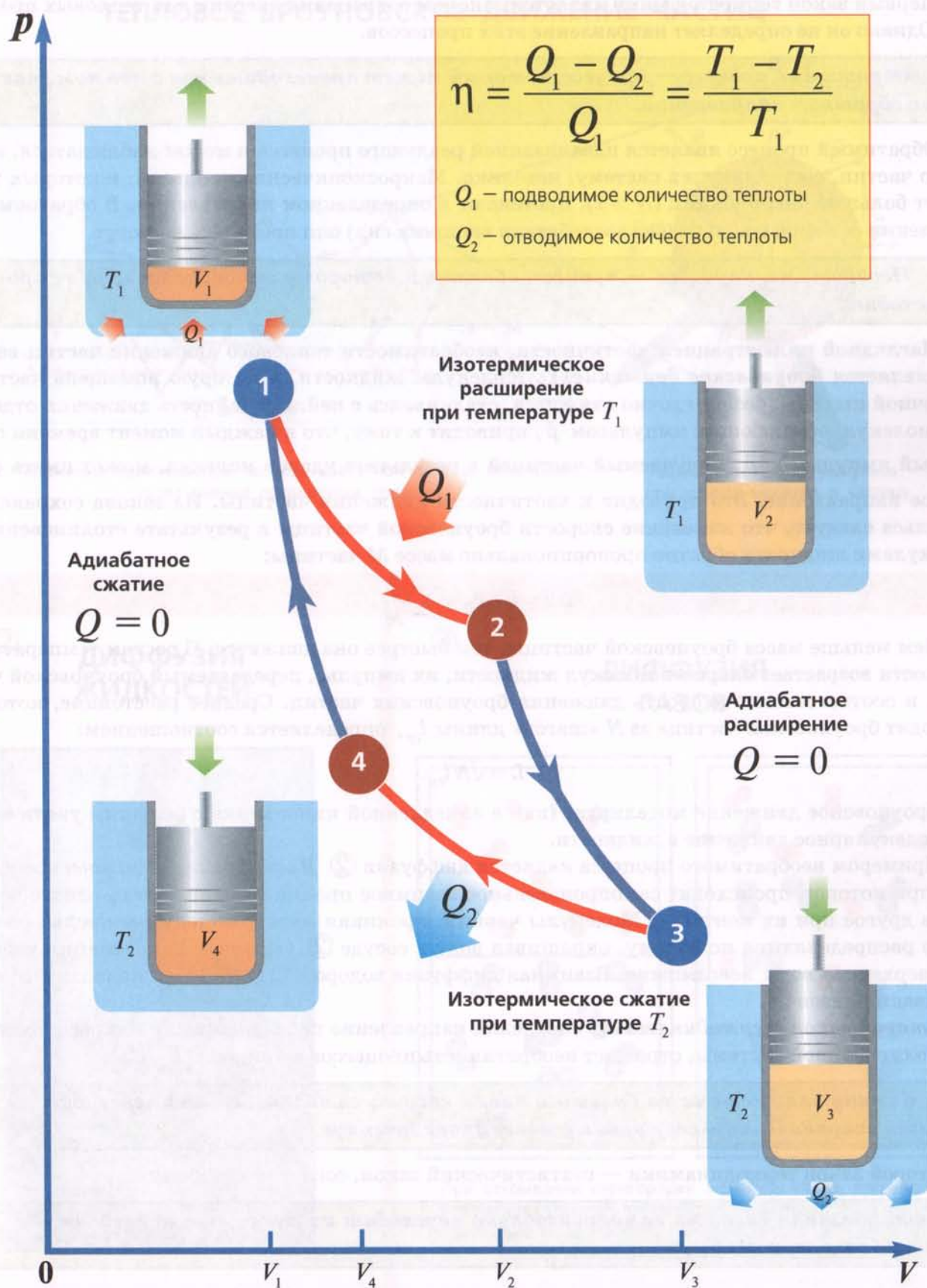
КПД теплового двигателя всегда меньше единицы:

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

В 1828 г. Сади Карно предложил использовать для теплового двигателя цикл, состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов, имеющий максимальный КПД:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Количество теплоты Q_1 подводится при изотермическом расширении 1–2 при температуре T_1 . При адиабатном расширении 2–3 газ охлаждается до температуры T_2 . Количество теплоты Q_2 отводится при изотермическом сжатии 3–4.



§43. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики является законом сохранения энергии для тепловых процессов. Однако он не определяет направление этих процессов.

Обратимый процесс — процесс, который может происходить как в прямом, так и в обратном направлении.

Обратимый процесс является идеализацией реального процесса и может наблюдаться, если число частиц, составляющих систему, невелико. Макроскопические процессы, в которых участвует большое число частиц ($N \gg 1$), протекают в определенном направлении. В обратном направлении самопроизвольно (без воздействия внешних сил) они протекать не могут.

Необратимый процесс — процесс, обратный которому самопроизвольно не происходит.

Наглядной иллюстрацией хаотичности, необратимости теплового движения частиц вещества является **броуновское движение** ①. Молекулы жидкости, в которую помещена частица цветочной пыльцы, беспорядочно движутся, сталкиваясь с ней. Случайность движения отдельных молекул, обладающих импульсом $\vec{p}$, приводит к тому, что в каждый момент времени суммарный импульс $\sum \vec{p}$, получаемый частицей в результате ударов молекул, может иметь случайное направление. Это приводит к хаотичности движения частицы. Из закона сохранения импульса следует, что изменение скорости броуновской частицы в результате столкновений с молекулами жидкости обратно пропорционально массе M частицы:

$$\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0 = \sum \frac{\vec{p}}{M}.$$

Чем меньше масса броуновской частицы, тем быстрее она движется. С ростом температуры жидкости возрастает скорость молекул жидкости, их импульс, передаваемый броуновской частице, и соответственно скорость движения броуновских частиц. Среднее расстояние, которое проходит броуновская частица за N «шагов» длины l_{cp} , определяется соотношением:

$$L = \sqrt{N} l_{cp}.$$

Броуновское движение моделирует (как в замедленной киносъемке с большим увеличением) молекулярное движение в жидкости.

Примером необратимого процесса является диффузия ②. **Диффузия** — физическое явление, при котором происходит самопроизвольное взаимное проникновение частиц одного вещества в другое при их контакте. Молекулы чернил, проникая между молекулами воды, равномерно распределяются по объему, окрашивая воду в сосуде ②. Обратная локализация чернил на поверхности воды невозможна. Взаимная диффузия водорода и кислорода приводит к перемешиванию газов ③.

Второй закон термодинамики, определяя направление перехода между макросостояниями изолированной системы, отражает необратимость процессов в природе:

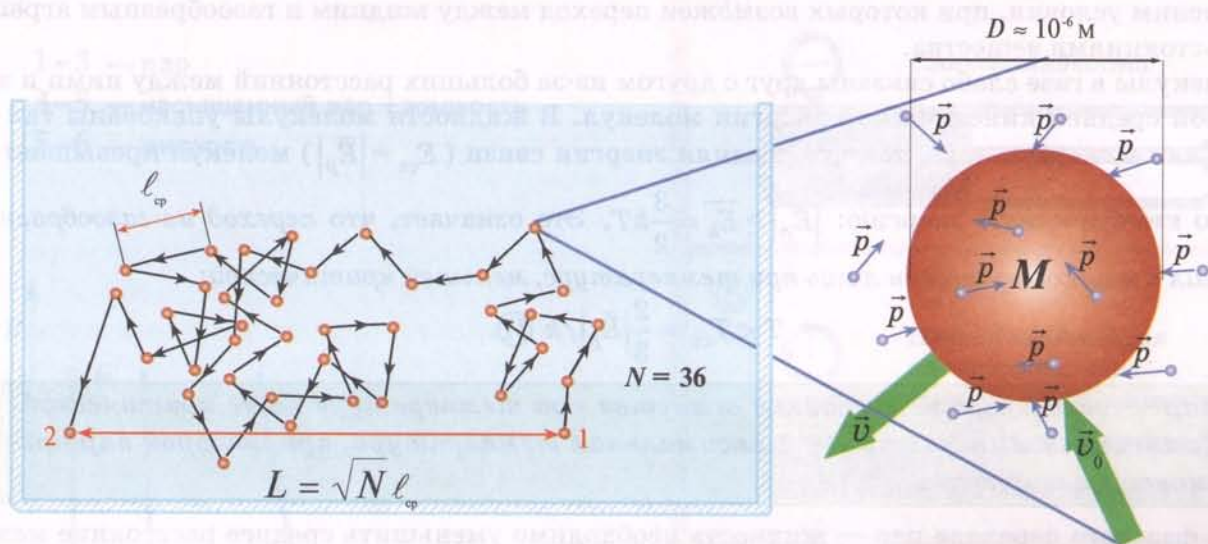
Замкнутая система из большого числа частиц самопроизвольно переходит из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное.

Второй закон термодинамики — статистический закон, согласно которому

изолированная система самопроизвольно переходит из менее вероятного состояния в более вероятное.

①

ТЕПЛОВОЕ БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ



Положения произвольной частицы цветочной пыли отмечены через равные промежутки времени

Закон сохранения импульса при ударах молекул о частицу

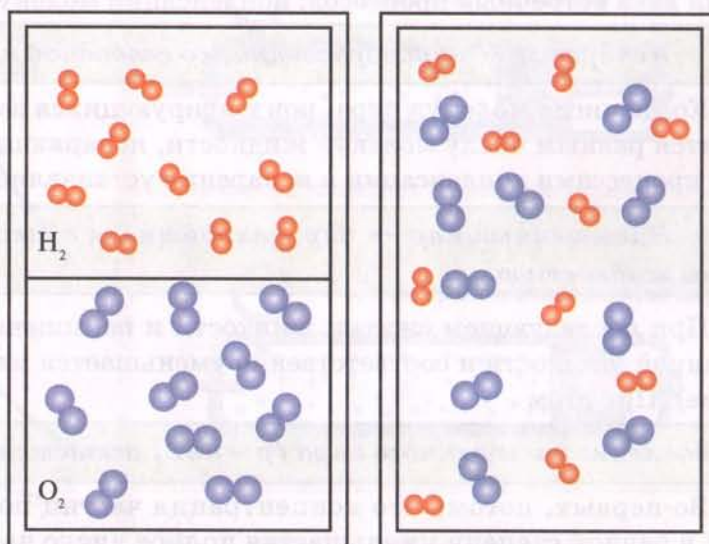
②

ДИФФУЗИЯ ЖИДКОСТЕЙ



③

ДИФФУЗИЯ ГАЗОВ



При открывании перегородки молекулы газов, проникая в межмолекулярные промежутки, смешиваются, несмотря на действие силы тяжести. Тяжелый кислород поднимается вверх, а легкий водород опускается вниз

§44. СЖИЖЕНИЕ ПАРА ПРИ ЕГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Выясним условия, при которых возможен переход между жидким и газообразным агрегатными состояниями вещества.

Молекулы в газе слабо связаны друг с другом из-за больших расстояний между ними и значительной средней кинетической энергии молекул. В жидкости молекулы упакованы так же плотно, как в твердом теле, так что средняя энергия связи ($E_{\text{св}} = |\bar{E}_p|$) молекул превышает их среднюю кинетическую энергию: $|\bar{E}_p| \geq \bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$. Это означает, что *переход из газообразного состояния в жидкое возможен лишь при температуре, меньшей критической*:

$$T < T_{\text{кр}} = \frac{2}{3}|\bar{E}_p|/k \quad \text{И.}$$

Пар — газообразное состояние вещества при температуре ниже критической. **Критическая температура** — максимальная температура, при которой пар превращается в жидкость.

Для фазового перехода пар — жидкость необходимо уменьшить среднее расстояние между молекулами. Это возможно при сжатии пара.

Рассмотрим последовательно изотермическое ($T = \text{const}$, $m = \text{const}$) сжатие пара, находящегося в цилиндре при температуре $T < T_{\text{кр}}$ ①. Состояние пара при его сжатии отмечено на изотерме сжижения пара (точка 1). Последующее сжатие увеличивает давление и концентрацию пара ② (точка 2 на изотерме). При дальнейшем уменьшении объема пара его молекулы сближаются столь значительно, что вследствие их притяжения образуются капли жидкости ③ (точка 3). Начинается

конденсация — переход пара из газообразного состояния в жидкое.

Масса образовавшейся жидкости оказывается постоянной (при данном объеме) из-за равновесия двух встречных процессов: конденсации молекул и испарения молекул жидкости.

Испарение — парообразование со свободной поверхности жидкости.

Когда число молекул пара, конденсирующихся за определенный промежуток времени, становится равным числу молекул жидкости, испаряющихся с ее поверхности за то же время, между процессами конденсации и испарения устанавливается **термодинамическое равновесие**.

Насыщенный пар — пар, находящийся в термодинамическом равновесии со своей жидкостью.

При последующем сжатии жидкости и насыщенного пара увеличивается масса конденсированной жидкости и соответственно уменьшается масса насыщенного пара ④ (точка 4 на изотерме). При этом

давление насыщенного пара ($p = nkT$) остается постоянным.

Во-первых, потому что концентрация частиц постоянна, так как при уменьшении объема V в равной степени уменьшается полное число частиц N из-за конденсации молекул пара. Во-вторых, при изотермическом сжатии постоянна температура. После полной конденсации пара ⑤ (точка 5) возможно незначительное сжатие жидкости ⑥ (точка 6). Резкое возрастание давления, необходимого для сжатия жидкости, объясняется ее малой сжимаемостью вследствие плотной упаковки молекул.

На диаграмме p, V приведены также изотермы при критической температуре пара и температуре, превышающей критическую. Последняя изотерма совпадает с изотермой идеального газа.

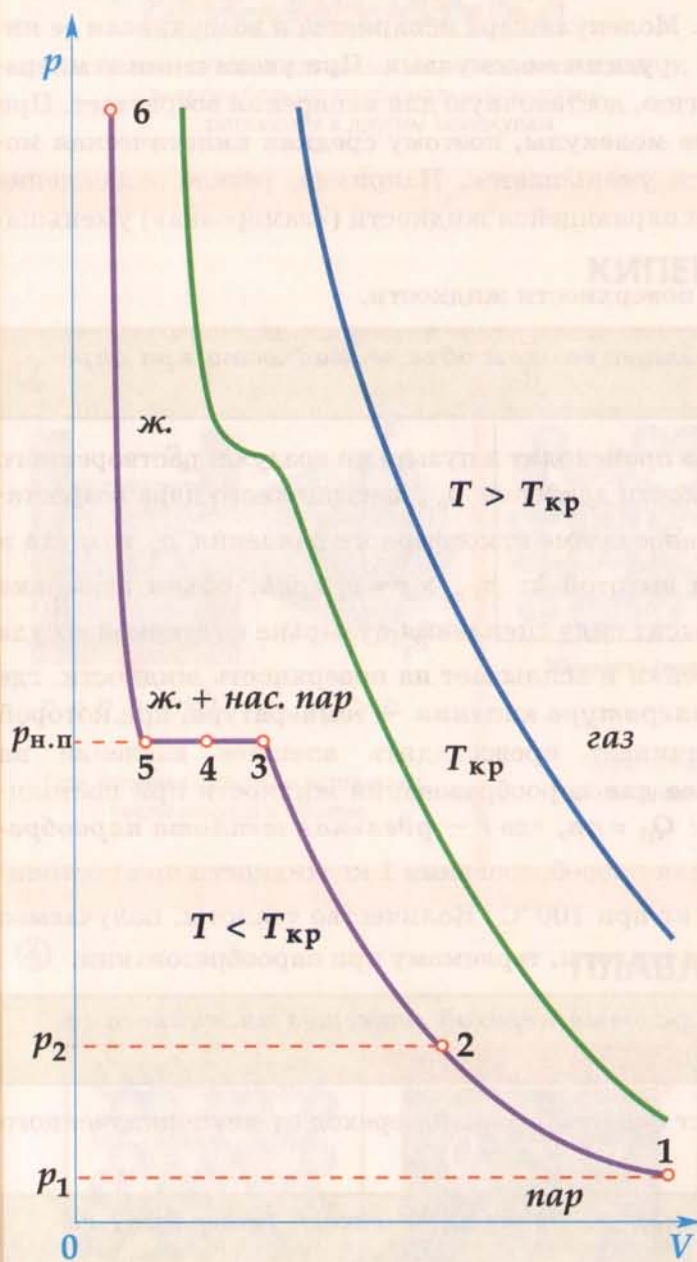
ИЗОТЕРМА СЖИЖЕНИЯ ПАРА

И

1-3 — пар

3-5 — насыщенный пар + жидкость

5-6 — жидкость



ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ПАРА

6



5



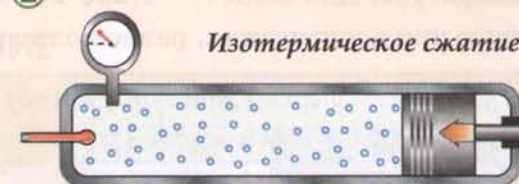
4



3



2



1



§45. ИСПАРЕНИЕ. КИПЕНИЕ. ПЛАВЛЕНИЕ

Фазовый переход — переход системы из одного агрегатного состояния в другое.

При фазовом переходе скачкообразно изменяется какая-либо физическая величина (например, плотность, внутренняя энергия) или симметрия системы. Наиболее часто наблюдаются фазовые переходы между агрегатными состояниями, у которых энергия связи молекул наиболее близка друг к другу. Остановимся более подробно на физическом механизме фазовых переходов жидкость — пар (испарение и кипение) и жидкость — твердое тело (кристаллизация и плавление).

Переход из жидкого состояния в газообразное может происходить в результате **испарения** — парообразования со свободной поверхности ①. Молекула пара испаряется в воздух, если ее кинетическая энергия больше ее энергии связи с другими молекулами. При увеличении температуры жидкости число молекул, имеющих энергию, достаточную для испарения возрастает. При испарении жидкость покидают самые быстрые молекулы, поэтому средняя кинетическая молекул и соответственно температура жидкости уменьшается. Например, резкое охлаждение кожи спортсмена после использования легко испаряющейся жидкости («заморозка») уменьшает болевые ощущения от полученной травмы.

Испарение может происходить не только с поверхности жидкости.

Кипение — парообразование, происходящее во всем объеме жидкости при определенной температуре ②.

В этом случае испарение насыщенного пара происходит в пузырьки воздуха, растворенного в жидкости. С повышением температуры жидкости давление $p_{н.п.}$ насыщенного пара возрастает. Если оно превысит внешнее давление p , равное сумме атмосферного давления p_a воздуха и гидростатического давления столба жидкости высотой h : $p_{н.п.} > p = p_a + \rho gh$, объем пузырька увеличивается. Когда сила Архимеда F_A превысит силу сцепления пузырька со стенкой сосуда и силу тяжести mg , пузырек отрывается от стенки и всплывает на поверхность жидкости, где он лопается, выбрасывая пар в атмосферу. **Температура кипения** — температура, при которой давление насыщенного пара жидкости начинает превосходить внешнее давление на жидкость ③. Количество теплоты, необходимое для парообразования жидкости при постоянной температуре, пропорционально ее массе m : $Q_{п} = rm$, где r — **удельная теплота парообразования** — количество теплоты, необходимое для парообразования 1 кг жидкости при постоянной температуре. Для воды $r = 2,256 \cdot 10^6$ Дж/кг при 100°C . Количество теплоты, получаемое жидкостью при конденсации, равно количеству теплоты, теряемому при парообразовании.

Кристаллизация (затвердевание) — фазовый переход вещества из жидкого состояния в кристаллическое (твердое) ④.

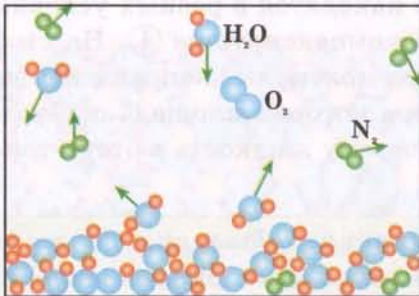
При кристаллизации жидкости происходит скачкообразный переход от неупорядоченного расположения частиц к упорядоченному.

Плавление — фазовый переход вещества из кристаллического (твердого) состояния в жидкое.

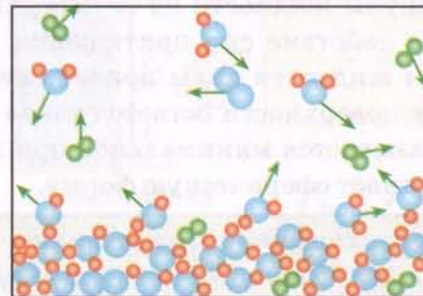
Количество теплоты, требуемое для расплавления массы m , $Q_{пл} = \lambda m$, где λ — **удельная теплота плавления** — количество теплоты, необходимое для плавления 1 кг вещества при температуре плавления ⑤.

①

ИСПАРИЕНИЕ



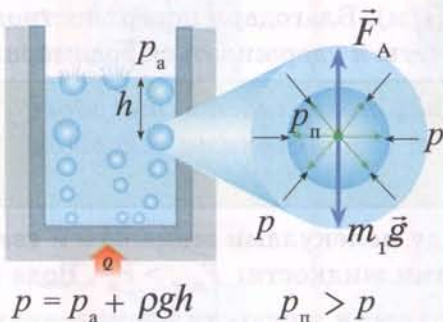
Молекула воды испаряется, если ее кинетическая энергия больше потенциальной энергии притяжения к другим молекулам



При увеличении температуры возрастает число молекул, имеющих кинетическую энергию, достаточную для испарения

КИПЕНИЕ

②



При кипении пузырьки всплывают, увеличиваясь в объеме

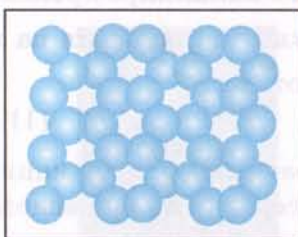
③



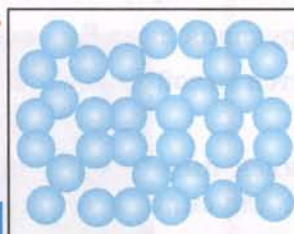
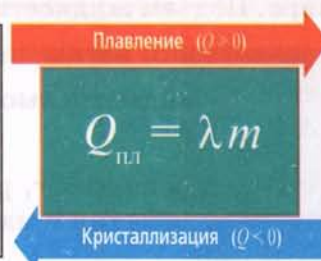
Теплота парообразования расходуется на разрыв связей между молекулами жидкости. Температура жидкости во время кипения остается постоянной

④

ПЛАВЛЕНИЕ



Твердое тело (лед)



Жидкость (вода)



Металл Ga плавится при температуре 29,8°C

Подводимое количество теплоты расходуется на разрушение упорядоченной кристаллической решетки твердого вещества. Температура тела остается постоянной

§46. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ. КАПИЛЛЯРНОСТЬ

Молекулы жидкости на ее поверхности и в глубине находятся в разных условиях. Внутри жидкости действие сил притяжения молекул взаимно компенсируется ①. На свободной поверхности жидкости силы притяжения, действующие на молекулы, направлены внутрь жидкости. На поверхности остается такое число молекул, при котором площадь поверхности жидкости оказывается минимальной при данном объеме. Поэтому жидкость в отсутствие внешних сил принимает сферическую форму.

Поверхностное натяжение — явление молекулярного давления на жидкость, вызванное притяжением молекул поверхностного слоя к молекулам внутри жидкости.

Поверхностная энергия — дополнительная потенциальная энергия молекул поверхностного слоя жидкости $E_{\text{пов}} = \sigma S$, где σ — коэффициент пропорциональности, характеризующий энергию молекул на единице площади S поверхности жидкости.

Сила поверхностного натяжения — сила, направленная по касательной к поверхности жидкости перпендикулярно участку контура, ограничивающего поверхность, в сторону ее сокращения ②. Сила поверхностного натяжения пропорциональна длине l границы поверхностного слоя:

$$F_{\text{пов}} = \sigma l.$$

Единица поверхностного натяжения — **ньютон на метр** (Н/м). Благодаря поверхностному натяжению воды на ее поверхности могут плавать легкие предметы и удерживаться водомерки.

Смачивание — искривление поверхности жидкости у поверхности твердого тела в результате взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела ③.

Вода смачивает стекло, потому что силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела $F_{\text{ж-т}}$ больше, чем силы притяжения между молекулами жидкости: $F_{\text{ж-т}} > F_{\text{ж}}$. Вода не смачивает парафин, так как $F_{\text{ж-т}} < F_{\text{ж}}$. **Мениск** — форма поверхности жидкости вблизи стенки сосуда. **Угол смачивания** — угол между плоскостью, касательной к поверхности жидкости, и стенкой. Для смачивающей жидкости угол смачивания — острый ($\Theta < 90^\circ$). Для несмачивающей жидкости угол смачивания — тупой ($\Theta > 90^\circ$).

Капиллярность — явление подъема или опускания жидкости в капиллярах (узких сосудах) ④.

Рассмотрим поведение жидкости в капилляре, опущенном в смачивающую жидкость. Силами $F_{\text{ж-т}}$ жидкость втягивается внутрь капилляра. Подъем жидкости в капилляре происходит до тех пор, пока результирующая сила $F_{\text{пов}}$ поверхностного натяжения, действующая на жидкость вверх, не уравновесится силой тяжести mg столба жидкости высотой h :

$$F_{\text{пов}} = mg. \quad (1)$$

Предположим, что мениск имеет форму полусферы радиусом r , равным радиусу капилляра. Подставляя выражения для силы поверхностного натяжения и массы в условие равновесия (1), получаем:

$$\sigma 2\pi R = \rho \pi r^2 h g. \quad (2)$$

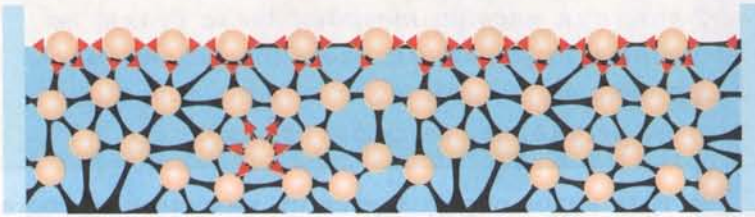
Откуда высота подъема жидкости в капилляре

$$h = 2\sigma / (\rho g r).$$

Чем меньше радиус капилляра, тем больше высота подъема жидкости в капилляре.

СТРУКТУРА ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ

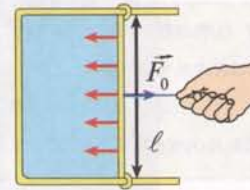
①



Внутри жидкости действие сил притяжения молекул взаимно компенсируется. На поверхности результирующая сил притяжения направлена внутрь жидкости

СИЛА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

②



Мыльная пленка

$$F = \sigma \ell$$

$$F_0 = F_1 + F_2$$

$$F_1 = F_2 = \sigma \ell$$

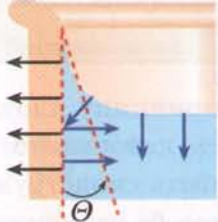
$$F_0 = 2\sigma \ell$$



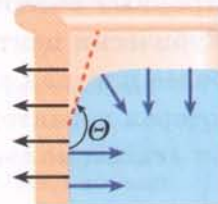
Вид сверху

СМАЧИВАНИЕ

③



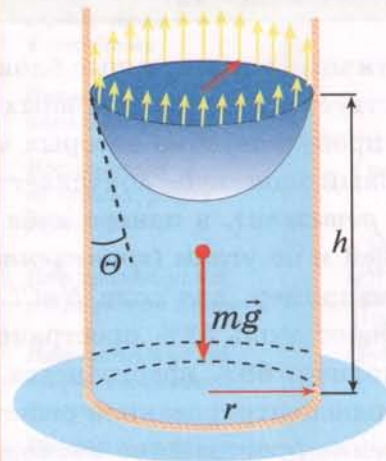
Смачивающая жидкость
($\theta < 90^\circ$)



Несмачивающая жидкость
($\theta > 90^\circ$)

КАПИЛЛЯРНОСТЬ

④



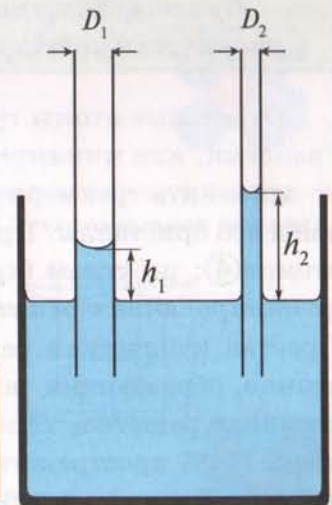
Равновесие жидкости в капилляре

$$F = \sigma \ell$$

$$F = mg$$

$$2\pi r \sigma = \rho \pi r^2 h g$$

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$



Поднятие жидкости в капиллярах
разного диаметра ($D_1 > D_2$, $h_1 < h_2$)

ДЕЙСТВИЕ СИЛ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ



Капля масла
в водном растворе
спирта



Водомерка
на поверхности воды



Скрепки
на поверхности жидкости

§47. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕЛА

Большинство веществ в умеренном климате Земли находится в твердом состоянии.

По характеру относительного расположения частиц твердые тела делят на три вида: кристаллические (с упорядоченным внутренним расположением молекул), аморфные (с неупорядоченной структурой) и композиты (с локально упорядоченным расположением молекул, но без регулярной периодичности).

Принадлежность твердых тел к одному из трех видов определяется их химическим составом. Разная пространственная конфигурация отдельных молекул предопределяет различие пространственной структуры, возникающей при их объединении в твердое тело. Упаковка молекул в пространстве аналогична заполнению плоскости правильными многоугольниками ①. Известный голландский художник Моритц Эшер предложил много оригинальных способов разбиения плоскости на одинаковые объекты различной конфигурации ②.

При наличии периодичности в расположении атомов твердое тело является кристаллическим.

Кристаллическая решетка — пространственная структура с регулярным, периодически повторяющимся расположением частиц.

Отдельные атомы группируются в идентичные элементарные блоки по принципу плотной упаковки, или минимума энергии ③. Существует всего семь основных блоков, которыми можно заполнить трехмерное пространство (без пропусков) и из которых могут быть сконструированы все кристаллы. Простейший элементарный блок — куб — допускает три способа размещения атомов ④: по углам (*простая кубическая решетка*), в центре куба и по углам (*кубически центрированная решетка*) и в центре граней и по углам (*гранецентрированная решетка*). Простая кубическая решетка характерна, например, для соли NaCl . Электронные оболочки атомов, образующих такую решетку, заполняют лишь 52% пространства. Кубически центрированная решетка, характерная для Fe , заполняет 68% пространства. Наиболее плотная упаковка (74% пространства) достигается при гранецентрированной решетке, которая характерна для Au . Такое же наиболее плотное заполнение пространства возможно при *гексагональной решетке*, характерной для Zn .

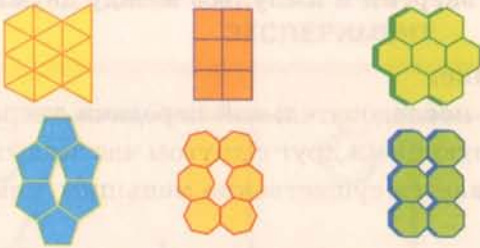
Кристаллические тела могут быть монокристаллическими и поликристаллическими. Внешняя форма *монокристалла* является правильной, отражая упорядоченное внутреннее расположение молекул ⑤. Углы между внешними гранями монокристалла оказываются постоянными. К монокристаллам относятся природные кристаллы (кварц, алмаз). *Поликристалл* состоит из отдельных монокристаллов. Примером поликристалла является сахар-рафинад.

Некоторые вещества, имеющие одинаковый химический состав, отличаются по физическим свойствам из-за различия структуры их кристаллических решеток.

Полиморфизм — существование различных кристаллических структур у одного и того же вещества ⑥.

Алмаз, графит и фуллерен — три разновидности углерода, имеющие разную кристаллическую структуру. В результате нагревания в вакууме при температуре около 150°C алмаз превращается в графит.

① ЗАПОЛНЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПРАВИЛЬНЫМИ МНОГОУГОЛЬНИКАМИ



Правильные пяти-, семи- и восьмиугольники не могут заполнить плоскость без пропусков

② ЗАПОЛНЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ОДИНАКОВЫМИ ОБЪЕКТАМИ



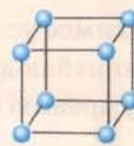
M.C. Escher (Нидерланды)

③ Основные элементы (ячейки) кристаллических решеток

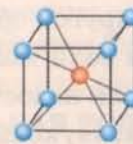
Кристаллическая решетка	Геометрия элемента
■ Кубическая	Куб
■ Тетрагональная	Прямоугольный параллелепипед с квадратом в основании
■ Орторомбическая	Прямоугольный параллелепипед
■ Моноклинная	Восемь углов не прямые, ребра разной длины
■ Триклинная	Нет прямых углов, ребра разной длины
■ Тригональная	Нет прямых углов, ребра одинаковой длины
■ Гексагональная	Призма с правильным шестиугольником в основании

④ ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

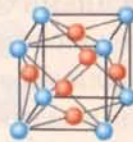
Кубическая решетка



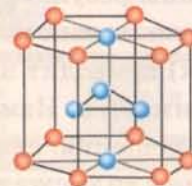
Кубически центрированная решетка



Гранецентрированная решетка



Гексагональная решетка



⑤ МОНОКРИСТАЛЛЫ

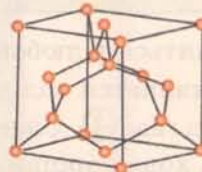
Монокристалл – твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку



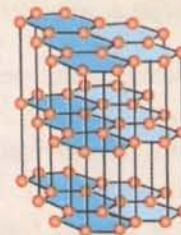
Внешняя форма монокристалла – правильная ввиду упорядоченного внутреннего расположения частиц

⑥ ПОЛИМОРФИЗМ УГЛЕРОДА

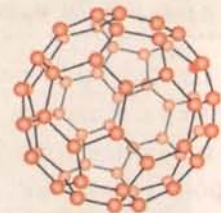
Полиморфизм – существование различных кристаллических структур у одного и того же вещества



Кристаллическая решетка алмаза



Кристаллическая решетка графита



Кристаллическая решетка фуллерена

§48. ВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС. ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

Существует два фундаментальных способа передачи энергии и импульса между двумя точками пространства:

- непосредственное перемещение частиц от точки к точке;
- перенос энергии без переноса вещества в результате последовательной передачи энергии и импульса по цепочке между соседними взаимодействующими друг с другом частицами среды. При этом перемещение отдельных частиц оказывается существенно меньшим, чем расстояние между точками пространства.

Волновой процесс — процесс переноса энергии без переноса вещества.

В результате внешнего воздействия на среду в ней возникает **возмущение** — отклонение частиц среды от положения равновесия.

Механическая волна — возмущение, распространяющееся в упругой среде.

Наличие упругой среды — необходимое условие распространения механических волн.

Одни виды волн можно визуально наблюдать (морские волны, рябь на поверхности воды), другие виды волн недоступны нашему зрению (электромагнитные, не относящиеся к диапазону видимого света, звуковые).

Рассмотрим волновой процесс передачи энергии в твердом теле (стержне) ①. Маятник 1, отклоненный от положения равновесия на некоторый угол, начинает двигаться к положению равновесия. Маятник 2, прислоненный к неподвижному, закреплённому стержню, отскакивает от него через некоторое время после удара о стержень маятника 1.

Объясним результат опыта с помощью одномерной механической модели кристалла в виде шариков, связанных между собой пружинами ②. Воздействие маятника на один из атомов (левый шарик) приводит к изменению его положения: пружина, соединяющая его с соседним шариком, сжимается. Изменение потенциальной энергии взаимодействия соседних атомов приводит к перемещению следующего атома (сжатию соседней пружины). Таким образом, внешнее воздействие в виде сжатия распространяется со скоростью $\vec{v}$ от атома к атому вдоль стержня.

Скорость механической волны — скорость распространения возмущения в среде.

Энергия взаимодействия крайних атомов правого конца стержня длиной l маятнику 2 через промежуток времени $t = l / v$ после удара маятника 1.

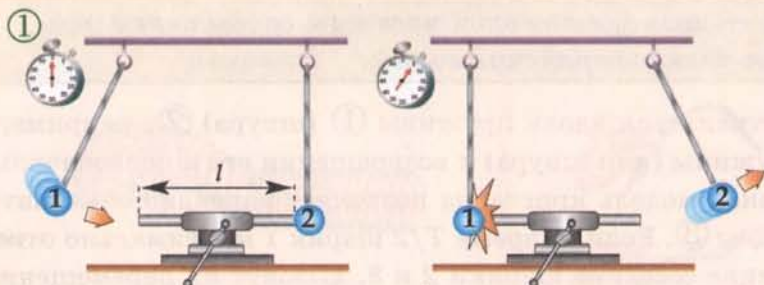
В рассматриваемом случае движение частиц среды происходит вдоль направления распространения волны, т.е. возникает продольная волна.

Продольная волна — волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в любой среде. Наглядным примером продольной механической волны в твердом теле является волна в пружине ③. Возможно возникновение и распространение продольной волны в газе ④. Сжатие газа поршнем изменяет компоненту скорости $\vec{v}$ молекул, направленную вдоль хода поршня. При последующих упругих столкновениях молекул одинаковой массы молекулы, движущиеся до удара со скоростью $\vec{v}$, останавливаются, а покоящиеся приобретают скорость $\vec{v}$ в направлении удара (подобно бильiardным шарам). Продольные волны могут возникать и в жидкости.

ВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

ЭКСПЕРИМЕНТ

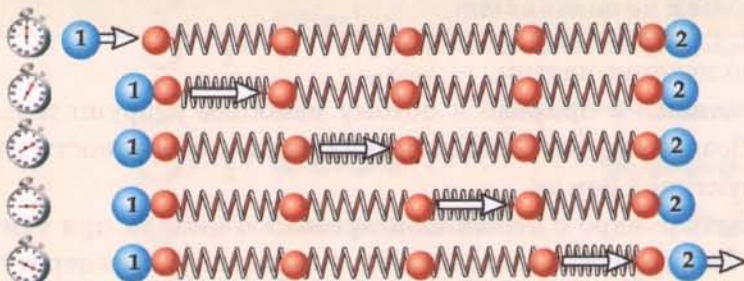


Механическая волна – возмущение, распространяющееся в упругой среде

Наличие упругой среды – необходимое условие распространения механических волн

② Теоретическая модель распространения продольной волны в твердом теле

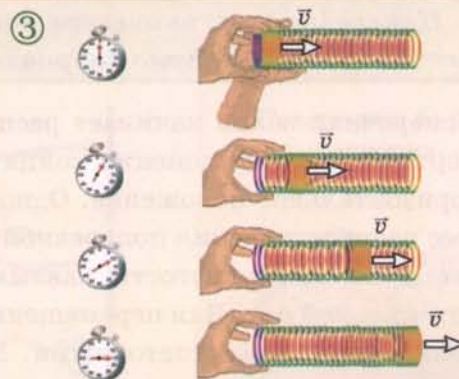
Продольная волна – волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны



Одномерная механическая модель кристалла – шарики (атомы), связанные между собой пружинами (электромагнитным взаимодействием)

ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

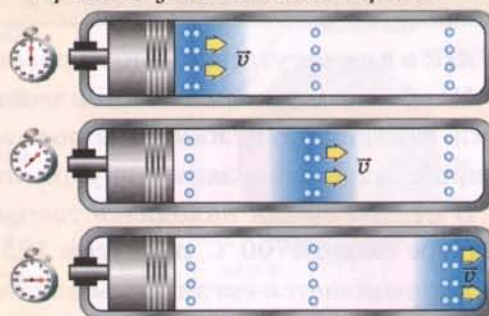
ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА В ПРУЖИНЕ



Скорость $\vec{v}$ механической волны – скорость распространения возмущения в среде

④ ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА В ГАЗЕ

Сжатие газа поршнем изменяет компоненту скорости $\vec{v}$ молекул, направленную вдоль хода поршня



Возникновение и распространение продольной механической волны в газе

МОРСКИЕ ВОЛНЫ

ВОЛНЫ В ОТКРЫТОМ ОКЕАНЕ



ВОЛНЫ У БЕРЕГА



§49. ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ

В твердом теле из-за сильной связи частиц между собой (большая потенциальная энергия их взаимодействия) возможно возникновение поперечных волн.

Поперечная механическая волна — волна, в которой частицы среды перемещаются перпендикулярно направлению распространения волны.

Поперечная волна начинает распространяться вдоль пружины ① (шнура) ②, например, при вертикальном отклонении конца пружины (или шнура) и возвращении его в первоначальное горизонтальное положение. Одномерная модель кристалла позволяет наглядно объяснить процесс распространения поперечной волны ③. Если за время $T/2$ шарик 1 максимально отведен вверх, то силы упругости, связывающие соседние шарики 2 и 3, вызовут их перемещение по вертикальной оси. Для перемещения остальных шариков возникающие силы упругости пружин оказываются недостаточными. Возвращение шарика 1 в первоначальное положение под действием внешней силы в момент времени T приведет в движение шарик 4 и связанные с ним шарики 5, 6. Шарик 4 двигается вверх, так как соседний с ним шарик 3 идет вниз, а пружина между ними, сохраняя первоначальное положение, «подбрасывает» вверх шарик 4. В момент времени $3T/2$ роль шарика 1 перейдет к шарiku 4, а в движение придет следующая тройка: 7, 8, 9.

Таким образом, первоначальное возмущение в направлении оси Y начинает распространяться в виде поперечной волны по оси X .

Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают,

так как в них отсутствует фиксированное положение частиц.

Наиболее мощными механическими волнами в природе и потому наиболее разрушительными являются *сейсмические волны* ④. Возникновение сейсмических волн и особенности их распространения связаны с внутренней структурой Земли.

В центре Земли находится твердое железное ядро с небольшой примесью никеля при температуре около 4700°C радиусом 1250 км. Твердое состояние, несмотря на высокую температуру, обеспечивается гигантским давлением в центре Земли, которое может достигать 3 млн. атм. Твердое ядро окружено жидким ядром примерно такого же состава радиусом 3470 км. Жидкое ядро представляет собой вращающиеся потоки расплавленного железа и никеля, хорошо проводящие электричество. Именно с ними связывают происхождение земного магнитного поля. В ядре сосредоточено около 35% массы Земли.

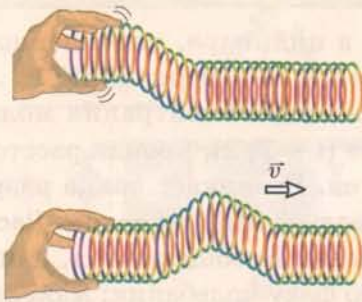
Вокруг жидкого ядра находится мантия из твердых силикатных пород, простирающаяся вплоть до глубины около 30 км от поверхности Земли. Наружный поверхностный шаровой слой составляет твердая земная кора, состоящая из силикатов и минералов.

Основная информация о внутреннем строении Земли получена в результате исследований сейсмических волн, возникающих при землетрясениях и мощных взрывах ⑤. Из-за наличия у Земли жидкого ядра поперечные сейсмические S — волны, имеющие скорость около 8 км/с, не фиксируются на стороне Земли, диаметрально противоположной месту землетрясения ⑥. Жидкое ядро — непреодолимое препятствие для поперечных сейсмических волн.

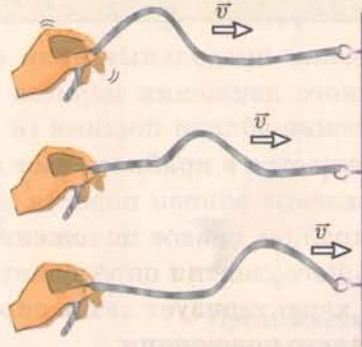
ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

ЭКСПЕРИМЕНТ

① Поперечные механические волны в пружине



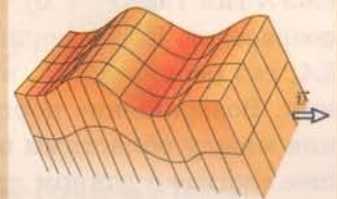
② Поперечные механические волны в шнуре



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

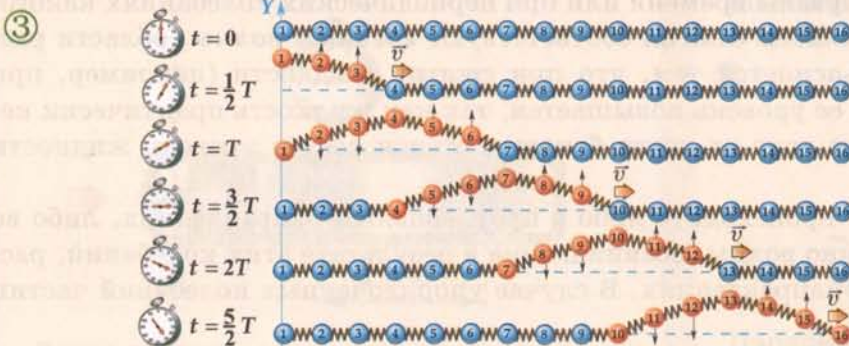
S – ВОЛНЫ

⑤ Поперечные волны в мантии



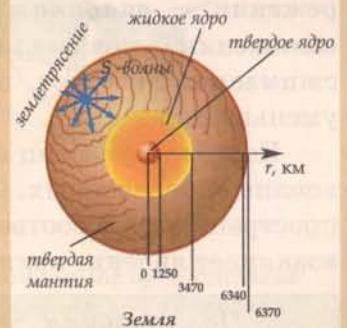
Теоретическая модель распространения поперечной волны в твердом теле

Поперечная механическая волна – волна, в которой частицы среды перемещаются перпендикулярно направлению распространения волны



Первоначальное возмущение вдоль оси Y распространяется в виде поперечной волны по оси X . Поперечные волны в газах и жидкостях не возникают, так как в них отсутствует фиксированное положение частиц

⑥ Огибание поперечными волнами жидкого ядра Земли



④ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ



Последствия землетрясения в Кобе (Япония) 1995 г.

§50. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Периодическое внешнее воздействие вызывает периодические волны в упругой среде. При гармонических колебаниях физическая величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально) с определенным периодом T (или частотой ν).

Гармоническая волна — волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды.

Возникновение гармонических продольных волн возможно в цилиндре, наполненном газом, в результате гармонического движения поршня с амплитудой A и периодом T . При сжатии газа ($t = 0$) его давление вблизи поршня (и соответственно концентрация молекул) возрастает. Когда поршень смещается в крайнее левое положение ($t = T/2$), пройдя расстояние $2A$, газ расширяется, а его давление вблизи поршня уменьшается. Возникает волна разрежения. Возвращение поршня в крайнее правое положение вновь создает волну сжатия. Расстояние между областями наибольшего сжатия определяет длину волны. Вообще говоря, наибольшее сжатие в данном примере характеризует лишь определенную фазу колебания: максимальное отклонение поршня от среднего положения.

Длина волны — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника:

$$\lambda = vT.$$

Гармонические волны на поверхности жидкости могут возникать, например, при падении в жидкость капель через равные интервалы времени или при периодических колебаниях какого-либо участка ее поверхности ②. Области сжатия соответствуют *гребням волны*, области разрежения — *впадинам* ③. Это объясняется тем, что при сжатии жидкости (например, при сближении боковых стенок сосуда) ее уровень повышается, так как жидкость практически несжимаема. Наоборот, при удалении друг от друга боковых стенок сосуда уровень жидкости уменьшается.

Колебания частиц среды могут происходить либо в произвольных направлениях, либо во вполне определенных. Соответственно волны, возникающие в результате этих колебаний, распространяются в соответствующих направлениях. В случае упорядоченных колебаний частиц возникает явление поляризации.

Поляризация — пространственная упорядоченность направления колебаний частиц среды в поперечной волне.

Для создания поперечных волн в горизонтальном шнуре достаточно периодически перемещать его конец, например, вверх и вниз. В этом случае колебания частиц шнура распространяются вдоль оси X в плоскости XY , которую называют плоскостью поляризации ④.

Плоскость поляризации — плоскость, в которой колеблются частицы в среде.

Рассмотренная волна является линейно-поляризованной.

Линейно-поляризованная механическая волна — поперечная волна, вызывающая колебания частицы среды вдоль определенного направления (линии).

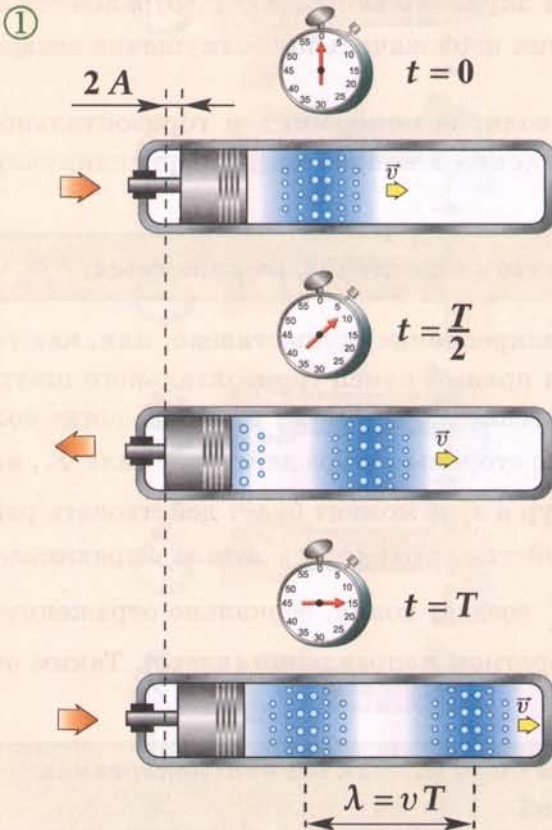
Для выделения волны определенной поляризации используют специальное устройство — *поляризатор*. Простейшим поляризатором является щель ⑤. Такой поляризатор не пропускает волну, поляризованную в плоскости XZ , перпендикулярной щели.

Световые волны поперечны. Это значит, что электромагнитные колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света.

ПРОДОЛЬНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ГАЗЕ

Периодическое внешнее возмущение вызывает гармонические волны, если оно изменяется по закону синуса или косинуса

Гармоническая волна – волна, порождаемая гармоническими колебаниями частиц среды

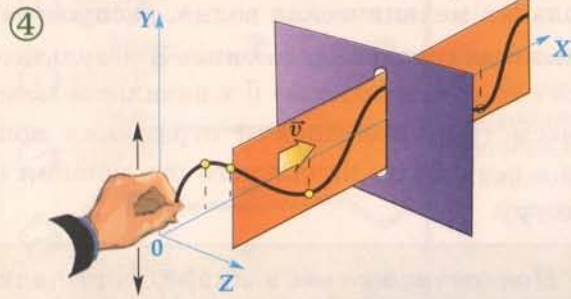


Длина волны – расстояние, на которое распространяется волна за период колебания ее источника: $\lambda = vT$

ПОПЕРЕЧНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Поляризация – пространственная упорядоченность направлений колебаний частиц среды в поперечной волне

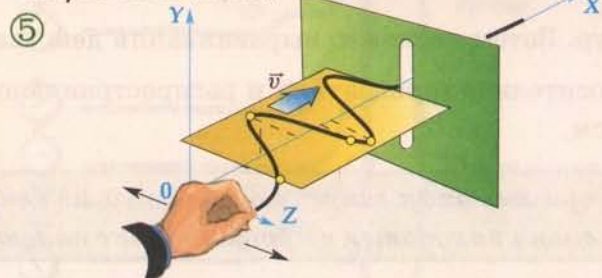
Плоскость поляризации – плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне



Прохождение через поляризатор (щель) гармонической поперечной механической волны

ПОЛЯРИЗАТОР

Линейно-поляризованная механическая волна – поперечная волна, вызывающая колебания частицы среды вдоль определенного направления (линии)



Поляризатор – непреодолимое препятствие для проникновения гармонической поперечной механической волны, линейно-поляризованной в плоскости XZ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЛН

② Гармонические волны на поверхности жидкости при падении капель через равные промежутки времени



③ ДЛИНА ВОЛНЫ

Гармонические волны на поверхности жидкости при периодических колебаниях участка поверхности



Длина волны – расстояние между соседними областями наибольшего сжатия

§51. ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН

Теннисный мяч, ударяясь о стенку, упруго отражается от нее, изменяя направление движения на противоположное. Препятствие на пути распространяющейся в пространстве волны, играя роль стенки в примере с теннисным мячом, вызывает ее отражение. Рассмотрим динамику распространения продольной механической волны в горизонтально расположенной пружине, возникшей в результате начального горизонтального сжатия левого конца пружины ①. Продольная механическая волна, распространяющаяся вправо со скоростью $\vec{v}$, отражается от ее правого закрепленного конца. В результате отражения первоначальное возмущение возвращается с той же скоростью $\vec{v}$ в начальное положение.

Рассмотрим особенности отражения поперечных волн, возникающих в горизонтальном шнуре в результате начального отклонения его левого конца в направлении, перпендикулярном шнуру.

Поперечная волна в шнуре, дошедшая до точки его закрепления, отражается.

Форма отраженной волны зависит от того, как это закрепление осуществлено, или, как говорят, от граничных условий. При жестком креплении правый конец горизонтального шнура привязан к неподвижному кольцу, прикрепленному к стенке ②. В момент времени, когда волна доходит до правого конца, на фиксирующее кольцо со стороны шнура действует сила $\vec{F}_1$, направленная вверх. По третьему закону Ньютона на шнур в этот момент будет действовать равная по величине сила $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$, направленная вниз. Действие этой силы сначала выравнивает шнур. Затем после его выравнивания действие силы $\vec{F}_2$ создает волну, зеркально отраженную относительно горизонтали и распространяющуюся в обратном направлении (влево). Таким образом,

при жестком креплении одного из концов шнура отраженная от него поперечная волна находится в противофазе с падающей волной.

Противоположная ситуация возникает, когда правый конец горизонтального шнура подвижен и может перемещаться свободно в направлении, перпендикулярном шнуру ③. Например, легкое кольцо, привязанное к правому концу шнура, может свободно, без трения скользить по вертикальному стержню. В момент времени, когда волна доходит до правого конца, кольцо начинает подниматься по инерции вверх (подобно океанской волне, накатывающейся на вертикальную стенку пирса).

Опускаясь вниз, правый конец веревки изменяет ее форму, создавая отраженную волну, совпадающую по форме с падающей. Таким образом,

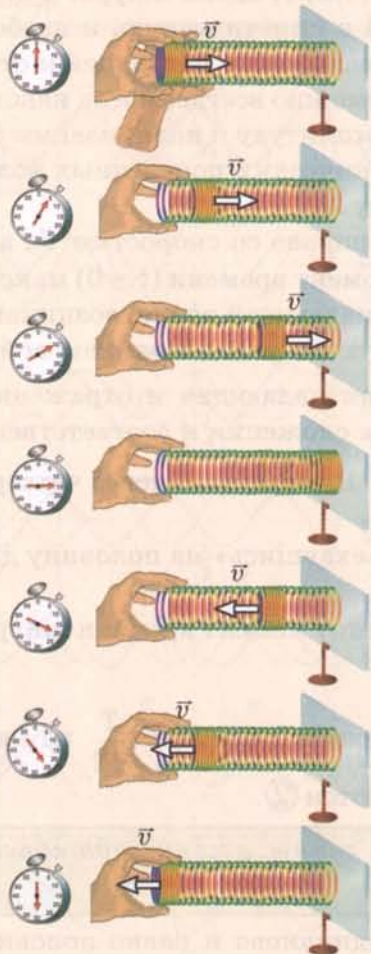
поперечная волна, отраженная от свободного конца шнура, находится в фазе с падающей волной.

Результирующая форма шнура определяется при сложении падающей и отраженной волн.

Подобное наложение падающей и отраженной волн можно наблюдать и на поверхности воды. Картина волн, возникающих на открытой воде, вдали от берега ④, например, при всплытии подводной лодки, существенно отличается от картины волн при ее движении в шлюзе ⑤. Волны, отраженные от стенок шлюза, накладываются на волны, вызванные движением подводной лодки на открытой воде, существенно влияя на ее движение.

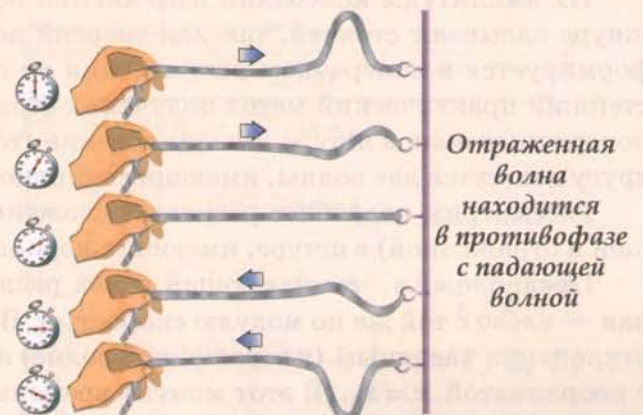
ОТРАЖЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ПРУЖИНЕ

① Правый конец пружины закреплен

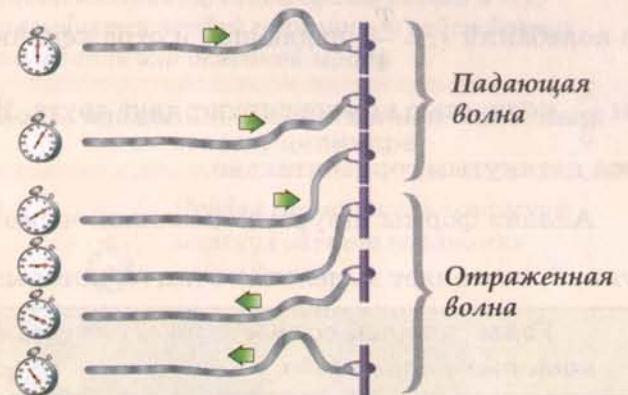


ОТРАЖЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ШНУРЕ

② Правый конец шнура закреплен



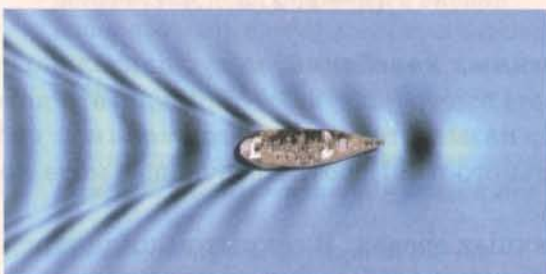
③ Правый конец шнура свободен



Отраженная волна находится в фазе с падающей волной

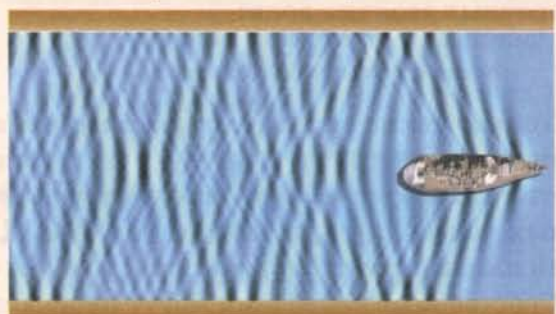
④ ВОЛНЫ НА ОТКРЫТОЙ ВОДЕ

Волны при всплытии подводной лодки



⑤ ВОЛНЫ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ (ШЛЮЗЕ)

Волны при движении корабля в шлюзе



Волны, отраженные от берегов шлюза, накладываются на волны, вызванные движением корабля на открытой воде

§52. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Стоячая поперечная волна — волна, все точки которой колеблются в одинаковой фазе.

Их амплитуды колебаний изменяются периодически от точки к точке. Подобную волну в шнуре называют стоячей, так как энергия не переносится (стоит) вдоль шнура, а лишь трансформируется в поперечном направлении из потенциальной в кинетическую, и наоборот. Простейший практический метод получения стоячей волны — наложение падающей и отраженной поперечных волн в шнуре. Возникновение стоячих волн возможно всегда, когда навстречу друг другу движутся две волны, имеющие одинаковый период, амплитуду и поляризацию ①.

Рассмотрим подробнее результат сложения двух гармонических поперечных волн (падающей и отраженной) в шнуре, имеющих период T и амплитуду A .

Предположим, что падающая волна распространяется вправо со скоростью $\vec{v}$, а отраженная — влево с той же по модулю скоростью. В начальный момент времени ($t = 0$) максимальные отклонения частицы 1 (в отраженной волне) и частицы 2 (в падающей волне) возникают в точке с координатой $x = x_0$. В этот момент времени сложение двух синусоид с одинаковой амплитудой A дает синусоиду с амплитудой $2A$. По мере того, как падающая и отраженная волны «разъезжаются» в разные стороны, изменяется результат их сложения и соответственно форма шнура, показанные через равные промежутки времени $\frac{T}{12}$. В частности, через четверть периода колебаний

($t = \frac{T}{4}$) падающая и отраженная волны, «разъехавшись» на половину длины волны $\frac{\lambda}{2}$, полностью компенсируют друг друга. В результате в этот момент времени шнур оказывается натянутым горизонтально.

Анализ формы шнура, показанной через равные промежутки времени $\frac{T}{12}$ на нижнем рисунке б, позволяет выделить точки N , которые не перемещаются ②.

Узлы стоячей волны — неподвижные точки волны, амплитуда колебаний которых равна нулю.

Расстояние между соседними узлами стоячей волны одинаково и равно половине длины волны внешнего гармонического воздействия.

Пучности стоячей волны — положения точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний.

Если закреплены оба конца шнура (или струны), отражение волны происходит от обоих концов ③. На длине l струны, закрепленной на концах, укладывается целое число n полуволн поперечных стоячих волн:

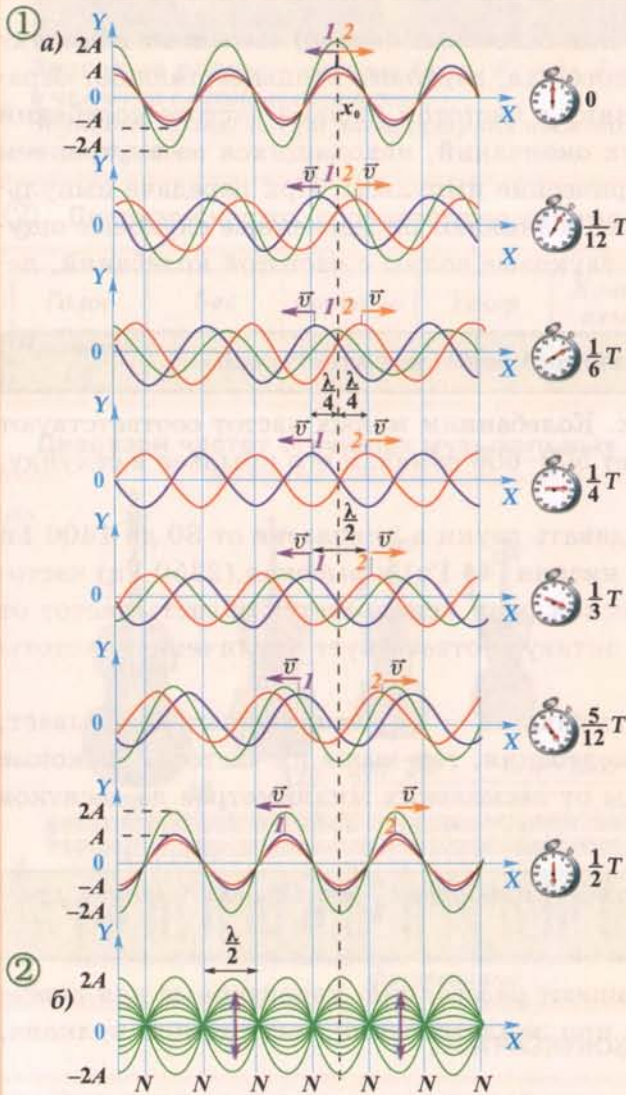
$$\frac{l}{(\lambda/2)} = n. \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Только такие волны, называемые *модами собственных колебаний*, могут длительно поддерживаться в струне. Волны других длин волн (частот) быстро затухают в результате потерь энергии. *Мода колебаний, соответствующая $n = 1$, называется первой гармоникой* собственных колебаний или *основной модой*. Для произвольного $n > 1$ соответствующая мода колебаний называется *n -й гармоникой* или *n -м обертоном*.

Собственные колебания могут происходить в различных средах. В закрытом цилиндре, наполненном газом, возникают моды продольных собственных колебаний газа под действием перемещения поршня ④. Изучение собственных колебаний в ограниченном объеме необходимо, в частности, для изготовления качественных духовых музыкальных инструментов.

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СТОЯЧИХ ВОЛН

Стоячая волна – волна, образующаяся в результате наложения двух гармонических волн, распространяющихся навстречу друг другу и имеющих одинаковый период, амплитуду и поляризацию



а) Сложение двух гармонических поперечных волн (падающей вправо и отраженной влево), имеющих период T

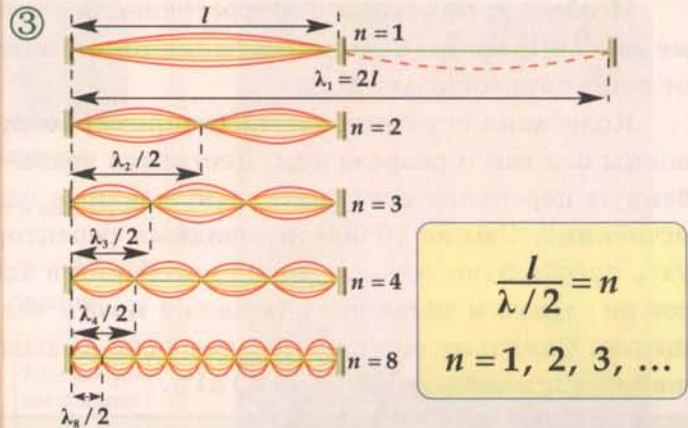
б) Пучности и узлы стоячей волны

Пучности – положения точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний

Узлы – неподвижные точки стоячей волны, амплитуда колебаний которых равна нулю

МОДЫ КОЛЕБАНИЙ

Моды собственных колебаний в струне, закрепленной на концах



На длине струны, закрепленной на концах, укладывается целое число n полуволн поперечных стоячих волн
Мода колебаний, соответствующая $n = 1$, называется первой гармоникой собственных колебаний или основной модой

Моды продольных собственных колебаний газа в цилиндре



Δx – смещение молекул газа от положения равновесия в определенный момент времени



§53. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. ВЫСОТА ЗВУКА

Звуковые волны — упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.

Необходимое условие распространения звуковых волн — *наличие упругой среды*. В вакууме звуковые волны не распространяются, так как там нет частиц, передающих взаимодействие от источника колебаний ①.

Колебания источника звука (например, струны или голосовых связок) вызывают в воздухе волны сжатия и разрежения. Достигнув человеческого уха, звуковые волны заставляют барабанную перепонку совершать вынужденные колебания с частотой, равной частоте колебаний источника. Свыше 20 000 нитевидных рецепторных окончаний, находящихся во внутреннем ухе, преобразуют механические колебания в электрические импульсы. При передаче импульсов по нервным волокнам в головной мозг у человека возникают определенные слуховые ощущения. Слуховые ощущения у человека вызывают звуковые волны с частотой колебаний, лежащей в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

Высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний.

Чем больше частота колебаний, тем выше звук. Колебаниям малых частот соответствуют низкие звуки. Например, писк комара соответствует 500–600 взмахам его крыльев в секунду, жужжание шмеля — 220 взмахам.

Колебания голосовых связок певцов могут создавать звуки в диапазоне от 80 до 1400 Гц (хотя экспериментально зафиксированы рекордно низкая (44 Гц) и высокая (2350 Гц) частоты) ②. В телефоне для воспроизведения человеческой речи используется область частот от 300 до 2000 Гц. На клавиатуре пианино сдвиг на октаву соответствует увеличению частоты звука вдвое ③.

Изучению звука посвящена специальная область физики — *акустика*. Опыт показывает, что чем меньше размер источника, вызывающего колебания, тем выше их частота. Звуковые волны создаются источниками, имеющими размеры от нескольких миллиметров до десятков метров.

Инфразвуковые волны — упругие волны, имеющие меньшую частоту ($\nu < 16$ Гц),

вызываются источниками, размеры которых превышают расстояния, характерные для повседневного опыта человека. Такие волны возникают при землетрясении, извержении вулкана, грозном разряде ④, взрыве ядерной бомбы ⑤.

Ультразвуковые волны — упругие волны, имеющие большую частоту ($\nu > 20$ кГц),

вызываются миллиметровыми источниками. Ультразвук способны излучать и улавливать некоторые животные, например, летучие мыши и дельфины ⑥. При крике летучей мыши генерируются ультразвуковые волны с частотой 100 кГц. Анализ отраженных сигналов, принимаемых при ультразвуковой локации, помогает животным ориентироваться в пространстве в условиях слабой освещенности или отсутствия видимого света и находить пищу. Частота ультразвукового сигнала, испускаемого дельфином (порядка 1 МГц), позволяет обнаруживать добычку диаметром 4 мм на расстоянии 30 м.

Ультразвуковая гидролокация позволяет исследовать морское дно, обнаруживать подводные объекты ⑦. Ультразвуковое исследование (УЗИ) внутренних органов позволяет проводить медицинскую диагностику, более безопасную для пациента, чем рентгенологическая.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ($16 \text{ Гц} < \nu < 20 \text{ кГц}$)

① Возникновение и восприятие звуковых волн

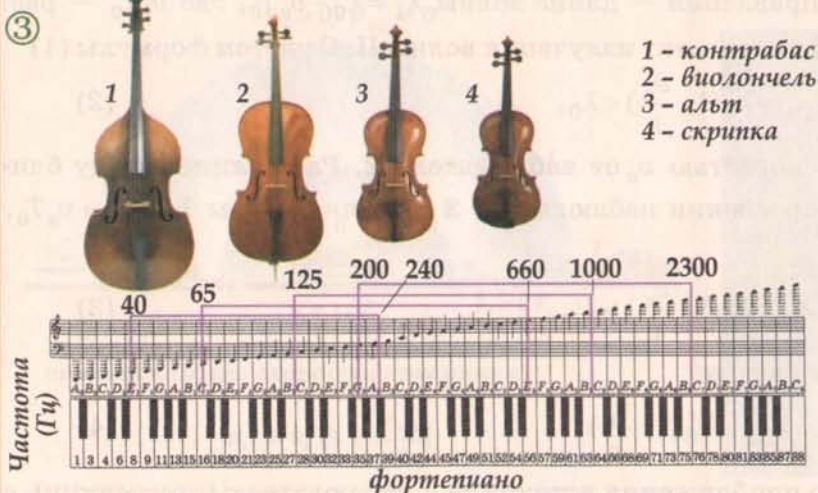


Звуковые волны – упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.
Звуковые волны могут распространяться только в материальной среде

② Диапазон частот, соответствующий голосу певца

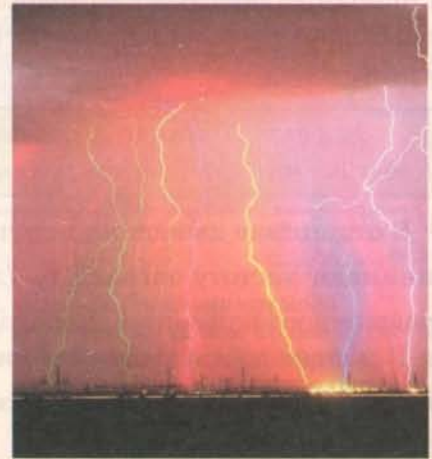
Голос	Бас	Баритон	Тенор	Контральто	Колоратурное сопрано
Частота, Гц	80 – 400	110 – 400	150 – 500	200 – 700	250 – 1400

Диапазон частот струнных музыкальных инструментов



ИНФРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ($\nu < 16 \text{ Гц}$)

④ ГРОЗОВОЙ РАЗРЯД



⑤ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ ВЗРЫВ



УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ($\nu > 20 \text{ кГц}$)

⑥ Ультразвуковая локация как способ ориентации в пространстве и поиска пищи в условиях слабой освещенности



При крике летучей мыши генерируется ультразвуковая волна с частотой 100 кГц



Частота ультразвукового сигнала, испускаемого дельфином, порядка 1 МГц

⑦ Ультразвуковая гидролокация



§54. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Высота звука определяется частотой источника звуковых колебаний. Однако сигнал одной и той же частоты может восприниматься наблюдателем по-разному в зависимости от того, движутся источник сигнала и наблюдатель друг относительно друга или нет. Например, звук сирены приближающегося автомобиля кажется наблюдателю более высоким, чем удаляющегося от него. Впервые подобный эффект был предсказан в 1842 г. австрийским физиком *Иоганном Доплером*.

Эффект Доплера — зависимость длина волны (частоты) сигнала, фиксируемого приемником, от скорости движения источника и приемника.

В отсутствие движения источника сигнала частотой ν_0 неподвижные наблюдатели 1 и 2 воспринимают частоту сигнала ν_0 (длину волны λ_0) ①. Волна сжатия I, распространяющаяся от неподвижного источника, попадает к наблюдателям через время t . Ближайшая к ней волна сжатия II дойдет до наблюдателей позднее на T_0 — период колебаний, генерируемых источником. Оба наблюдателя будут воспринимать одинаковую частоту сигнала $\nu_0 = 1/T_0$ и длину волны

$$\lambda_0 = \nu T_0, \quad (1)$$

где λ_0 — расстояние между двумя волнами сжатия I и II, ν — скорость звука.

Если источник движется со скоростью ν_n к наблюдателю 1 ②, расстояние между ближайшими волнами сжатия I и II в этом направлении — длина волны $\lambda_1 = \lambda_0 - \nu_n T_0$, где $\nu_n T_0$ — расстояние, на которое сместился источник на момент излучения волны II. С учетом формулы (1)

$$\lambda_1 = \lambda_0 \left(1 - \frac{\nu_n}{\nu}\right) < \lambda_0. \quad (2)$$

При этом источник удаляется со скоростью ν_n от наблюдателя 2. Расстояние между ближайшими волнами сжатия I и II в направлении наблюдателя 2 — длина волны $\lambda_2 = \lambda_0 + \nu_n T_0$. С учетом формулы (1)

$$\lambda_2 = \lambda_0 \left(1 + \frac{\nu_n}{\nu}\right) > \lambda_0. \quad (3)$$

Формулы (2), (3) можно представить в виде

$$\lambda_{1,2} = \lambda_0 \left(1 \pm \frac{\nu_n}{\nu}\right), \quad (4)$$

где знак «минус» соответствует случаю приближения источника к наблюдателю (приемнику), а знак «плюс» — случаю удаления источника от наблюдателя. По формулам (2), (3), где роль ν играет скорость света c , определяют скорость движения отдаленных галактик. При приближении галактики воспринимаемая длина волны уменьшается, а при удалении — увеличивается («красное смещение»).

С увеличением скорости источника расстояние между ближайшими звуковыми волнами сжатия в направлении движения уменьшается (см. формулу (2)).

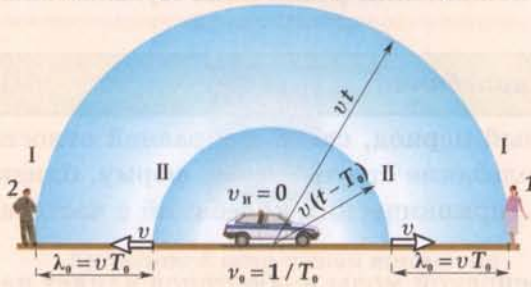
Частота звука от неподвижного источника сигнала зависит от скорости движения приемника ③

$$\nu_{1,2} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{\nu_{np}}{\nu}\right).$$

При достижении источником звуковых волн скорости звука: $\nu_n = \nu$, волны сжатия накладываются друг на друга, резко увеличивая результирующее сжатие. Возникает ударная волна ④. Такая волна уплотнения воздуха возникает при преодолении истребителем звукового барьера. При $\nu_n > \nu$ фронт ударной волны располагается под углом α к направлению движения источника ⑤.

① НЕПОДВИЖНЫЙ ИСТОЧНИК СИГНАЛА И НАБЛЮДАТЕЛИ 1 И 2

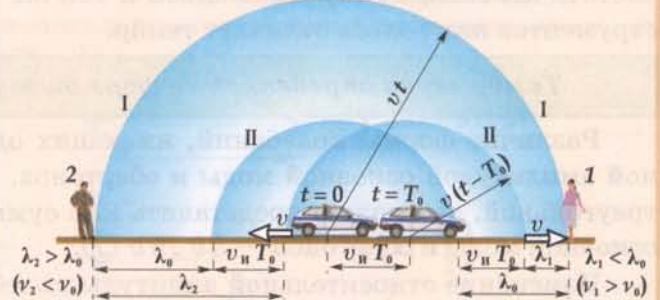
$v_n = 0$; $v_{пр.} = 0$; v – скорость звука



Частоты сигнала (длины волн), воспринимаемые наблюдателями 1 и 2, совпадают с частотой ν_0 (длиной волны λ_0) сигнала источника

② ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК И НЕПОДВИЖНЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ 1 И 2

$v_n \neq 0$; $v_{пр.} = 0$

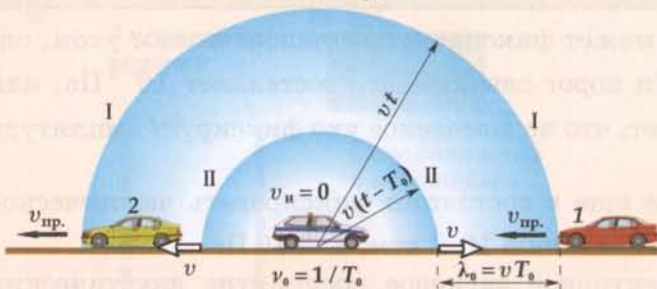


Длина волны λ_1 сигнала, воспринимаемого наблюдателем 1, меньше λ_0 . Длина волны λ_2 сигнала, воспринимаемого наблюдателем 2, больше λ_0

$$\lambda_{1,2} = \lambda_0 \left(1 \pm \frac{v_n}{v} \right)$$

③ НЕПОДВИЖНЫЙ ИСТОЧНИК СИГНАЛА И ДВИЖУЩИЕСЯ НАБЛЮДАТЕЛИ 1 И 2

$v_n = 0$; $v_{пр.} \neq 0$



Зависимость частоты звука, воспринимаемого приемником, от скорости приемника

$$\nu_{1,2} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v_{пр.}}{v} \right)$$

④ Преодоление истребителем звукового барьера



⑤ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

а) $v_n = 0$



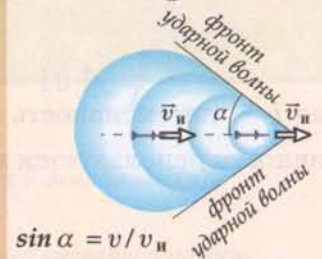
б) $v_n < v$



в) $v_n = v$



г) $v_n > v$



§55. ТЕМБР. ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Звуковое колебание характеризуется **спектром** — зависимостью давления p воздуха, создаваемого источником, от частоты ν колебаний ①. Данной ноте соответствует определенная частота колебаний. Звучание одной и той же ноты в исполнении различных музыкальных инструментов или голоса отличает тембр.

Тембр звука определяется формой звуковых колебаний.

Различие формы колебаний, имеющих одинаковый период, связано с разной относительной амплитудой основной моды и обертонов. Если колебание струны имеет форму, близкую к треугольной, его можно представить как сумму трех гармонических колебаний с частотами ν основной моды и обертонов — 3ν , 5ν ②.

Изменение относительной амплитуды колебаний основной моды и обертонов влияет на форму результирующего колебания и соответственно его тембр ③. Тембр ноты «ля» малой октавы (основная мода 220 Гц) различен в исполнении скрипки и трубы ④: спектр скрипки больше насыщен высокими обертонами.

При воздействии на струну медиатором в ней возбуждается больше высших гармоник, чем когда ее трогают пальцами. Высшие гармоники придают звукам балалайки звенящую окраску. Следует иметь в виду, что чувствительность человеческого уха зависит от частоты звука. Ухо наиболее чувствительно к колебаниям с частотой порядка 3,5 кГц.

Громкость звука зависит от амплитуды колебаний давления в звуковой волне ⑤.

Минимальное изменение давления, которое может фиксироваться человеческим ухом, определяет **порог слышимости**. При частоте 1 кГц порог слышимости составляет 10^{-5} Па, или 10^{-10} атм. Подобное изменение давления означает, что человеческое ухо фиксирует амплитуду колебаний молекул порядка 1 нм.

Максимальное изменение давления, которое еще в состоянии фиксировать человеческое ухо, определяет **болевой порог**, соответствующий давлению 10^{-4} атм, или 10 Па.

Если громкость звука характеризует субъективное звуковое восприятие акустических волн, то уровень интенсивности звука является объективной энергетической характеристикой звуковых волн.

Интенсивность звука — отношение звуковой мощности, падающей на поверхность, к площади этой поверхности.

Единица интенсивности звука — **ватт на квадратный метр** ($\text{Вт}/\text{м}^2$). **Порог слышимости** — соответствует интенсивности звука $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$; болевой порог $I_{\text{б.п.}} = 1 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Уровень интенсивности звука — десятичный логарифм отношения двух интенсивностей (единица — белл (Б)) ⑥:

$$k = \lg \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

где I — интенсивность звука, I_0 — порог слышимости. На практике в качестве уровня интенсивности используется величина, в 10 раз большая (единица — **децибелл (дБ)**):

$$\beta = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right).$$

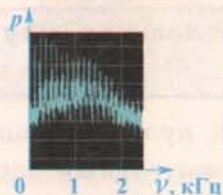
Уровень интенсивности 120 дБ является болевым порогом. Увеличение интенсивности звука на 10 дБ примерно удваивает громкость.

ТЕМБР ЗВУКА

Форма звукового колебания

Основная мода и обертоны

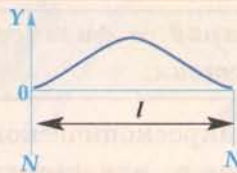
①



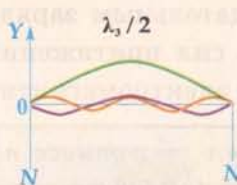
Креcendo в исполнении тромбона



②



$$y = y_1 + y_3 + y_5$$



$$y_1 \left(\lambda_1 = \frac{l}{2} \right)$$

$$y_3 \left(\lambda_3 = \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{3} \right)$$

$$y_5 \left(\lambda_5 = \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{5} \right)$$

Реальное колебание y , представленное в виде суммы трех гармонических мод y_1, y_3, y_5

Нота "ля" малой октавы (A_3 ; 220 Гц)

③

в исполнении скрипки

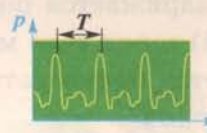


Основная мода и обертоны



④

в исполнении трубы



Основная мода и обертоны



ГРОМКОСТЬ (ИНТЕНСИВНОСТЬ) ЗВУКА

⑤

Громкость звука зависит от амплитуды колебаний давления в звуковой волне и характеризуется уровнем интенсивности звука

Интенсивность звука – отношение падающей на поверхность звуковой мощности к площади этой поверхности

Единица интенсивности звука – ватт на квадратный метр (Вт/м^2)

Порог слышимости соответствует интенсивности звука $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$; болевой порог $I_{\text{б.п.}} = 1 \text{ Вт/м}^2$

⑥

Уровень интенсивности звука

$$\beta = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

измеряют в децибелах (дБ)

Болевому порогу соответствует уровень интенсивности звука 120 дБ

§56. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

В макроскопических телах действуют гигантские (по сравнению с гравитационными) электромагнитные силы притяжения и отталкивания заряженных частиц.

Электрический заряд — физическая величина, определяющая силу электромагнитного взаимодействия.

Суммарный заряд макроскопического тела обычно равен нулю, так как оно состоит из электронейтральных атомов, для которых суммарный положительный заряд протона ядра уравнивается отрицательным зарядом атомных электронов. Этим объясняется уникальная сбалансированность сил притяжения и отталкивания заряженных частиц внутри тел и практическое отсутствие электромагнитного взаимодействия между ними.

Электризация тел — процесс получения электрически заряженных макроскопических тел из электронейтральных.

При электризации тел, т.е. при нарушении в нем баланса заряженных частиц, электрические силы притяжения и отталкивания легко наблюдаются экспериментально. Нарушение этого баланса возможно либо при удалении электронов из электронных оболочек атомов, либо при присоединении дополнительных электронов на внешнюю электронную оболочку. В первом случае тело заряжается положительно, во втором — отрицательно. Обычно результирующий (избыточный) заряд тела много меньше полного заряда протонов и электронов в отдельности, так как удается ионизовать лишь незначительную часть атомов образца. Согласно *закону сохранения заряда*:

Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна.

Остановимся на четырех возможных типах электризации: ① *трением*, ② *соприкосновением*, ③ *влиянием* и ④ *облучением*.

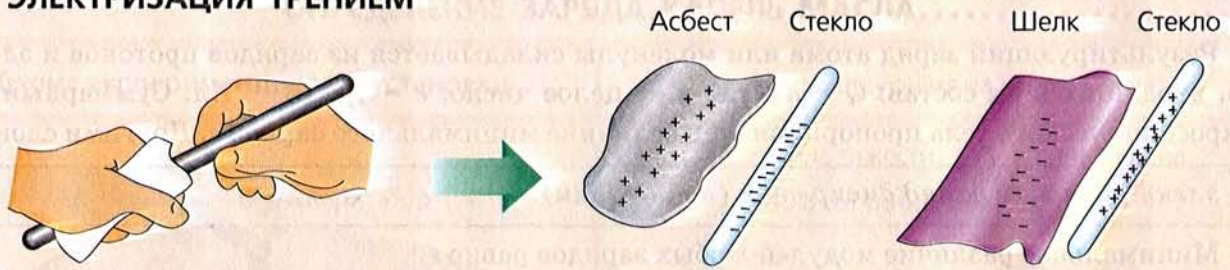
1. Степень электризации тел в результате трения характеризуется значением и знаком электрического заряда, полученного телом. При трении стекла об асбест стекло заряжается отрицательно, а асбест — положительно. В результате трения стекла о шелк стекло заряжается положительно, а шелк — отрицательно. Положительно заряжается вещество, отдающее электроны (асбест). В атоме такого вещества электрон слабо связан с атомом. В другом веществе (стекле) атом готов присоединить (удержать) электрон, образуя отрицательный ион. При этом стекло заряжается отрицательно. В общем случае при взаимном трении положительно заряжается вещество, имеющее меньшую энергию связи электрона в атоме, а отрицательно — большую. Уменьшение числа электронов в одном теле равно увеличению их числа в другом.

2. При соприкосновении заряженной стеклянной палочки с электронейтральным шаром, подвешенным на нити, часть заряда переходит на шар. Последующее отталкивание одноименных зарядов отклоняет шар от положения равновесия.

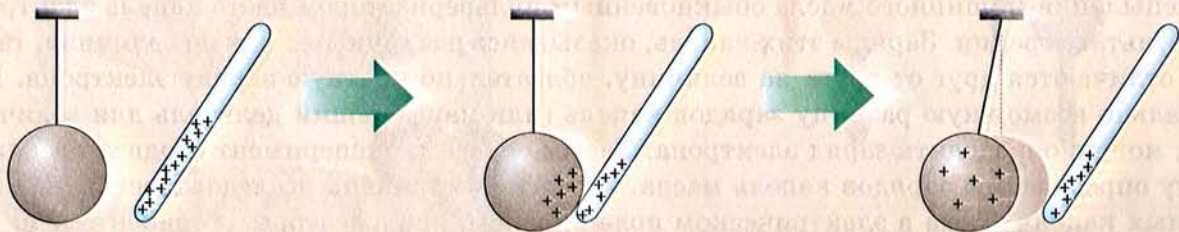
3. Электризация влиянием иллюстрируется перераспределением зарядов на поверхности электронейтральной металлической сферы под действием электрического поля отрицательно заряженного стеклянного стержня. Положительные заряды притягиваются к стержню, отрицательные — отталкиваются от него. В результате соприкосновения поляризованной сферы с электронейтральной часть заряда переходит на вторую сферу.

4. Электризация селена, заряжающегося отрицательно при облучении светом, используется, например, в ксерокопирующих машинах.

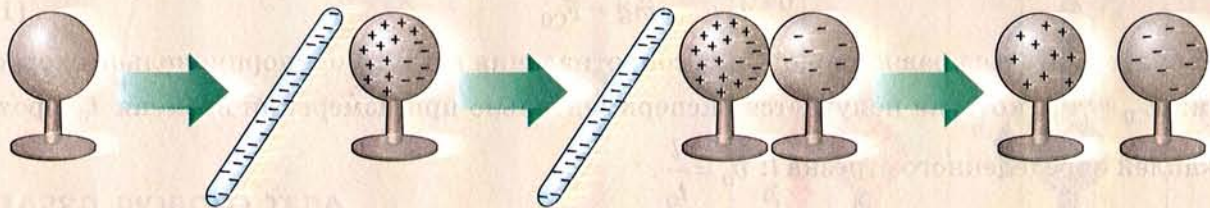
① ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТРЕНИЕМ



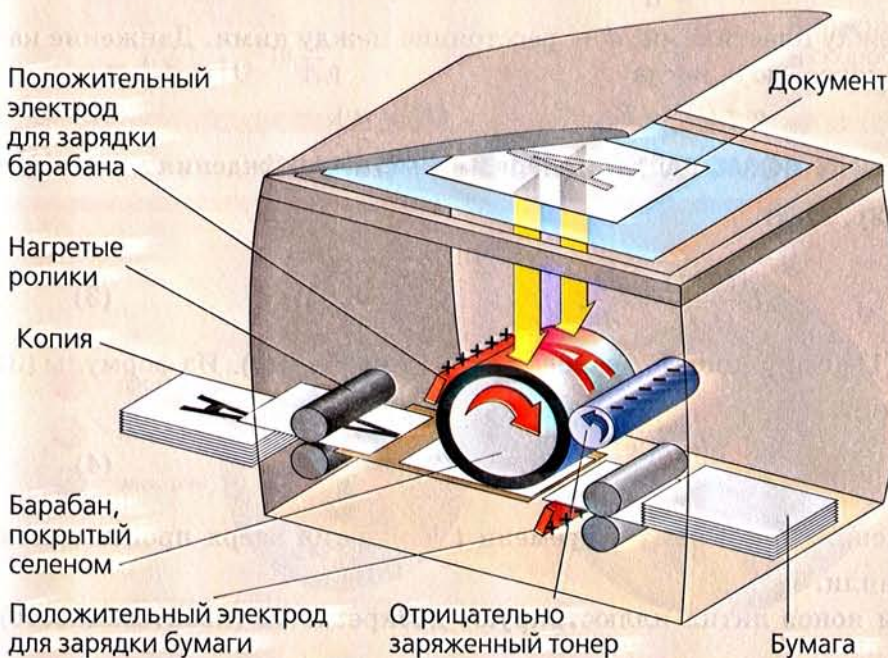
② ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ СОПРИКОСНОВЕНИЕМ



③ ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЕМ



④ ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ



Положительно заряженный алюминиевый цилиндр ксерокопировальной машины покрыт селеном, электризующимся отрицательно под действием света. Области цилиндра, освещаемые светом, становятся электронейтральными. Части цилиндра, на которые свет не попадает, остаются положительно заряженными и притягивают отрицательно заряженный черный порошок. Порошок фиксируется нагретыми роликами на положительно заряженной бумаге

§57. ОПЫТ МИЛЛИКЕНА

Результирующий заряд атома или молекулы складывается из зарядов протонов и электронов, входящих в их состав: $Q = ne$, где n — целое число; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Суммарный заряд макроскопического тела пропорционален величине минимального заряда e . Другими словами

электрический заряд дискретен (квантован).

Минимальное различие модулей любых зарядов равно e .

Впервые дискретность электрических зарядов была доказана в опыте американского физика **Роберта Миллика** ①, поставленном в 1909–1913 гг. в Чикагском университете. В этом опыте была определена величина заряда электрона. Идея эксперимента состоит в следующем. При распылении машинного масла обыкновенным пульверизатором часть капель электризуется в результате трения. Заряды этих капель, оказываясь различными как по величине, так и по знаку, отличаются друг от друга на величину, обязательно кратную заряду электрона. Найдя минимально возможную разницу зарядов капель (или наименьший делитель для величин зарядов), можно определить заряд электрона. Таким образом, эксперимент сводится к наиболее точному определению зарядов капель масла. В опыте Миллика исследовалось движение заряженных капель масла в электрическом поле плоского конденсатора с горизонтально расположенными пластинами. В отсутствие электрического поля ② на каплю радиусом r и плотностью ρ , движущуюся вниз, действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила сопротивления воздуха $\vec{F}_{C0}$ (если пренебречь силой Архимеда $\vec{F}_A$). При равенстве этих сил

$$mg = F_{C0} \quad (1)$$

капля будет двигаться равномерно. Сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости v_0 капли: $F_{C0} = \gamma v_0$, которая получается экспериментально при измерении времени t_0 прохождения капель определенного отрезка l : $v_0 = \frac{l}{t_0}$.

Если верхняя пластина заряжается положительно ③, то отрицательно заряженные капли начинают двигаться вверх, притягиваясь к ней кулоновской силой (§61)

$$F_K = \frac{qU}{d},$$

где U — разность потенциалов между пластинами, d — расстояние между ними. Движение капли становится равномерным со скоростью v , когда

$$mg + F_C = F_K, \quad (F_C = \gamma v). \quad (2)$$

Скорость v движения капли вверх можно найти, измеряя время t прохождения капель отрезка l : $v = \frac{l}{t}$. Подстановка (1) в (2), дает:

$$\gamma l \frac{(t_0 + t)}{(t_0 t)} = \frac{qU}{d}. \quad (3)$$

В соответствии с равенством (1) коэффициент γ зависит от t_0 , т.е. $\gamma = \gamma(t_0)$. Из формулы (3) получаем окончательно заряд капли:

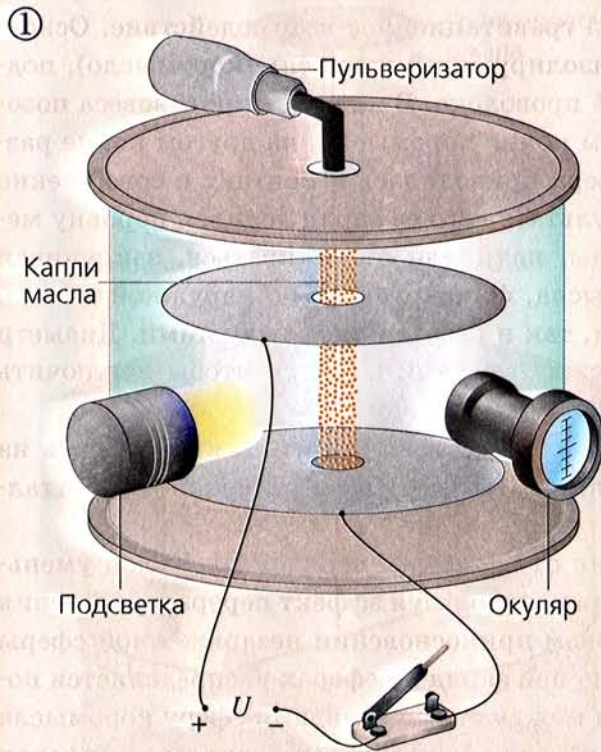
$$q = \frac{\gamma l d (t_0 + t)}{t_0 t U}. \quad (4)$$

Измерения времени t_0 движения капли вниз и времени t движения вверх производятся каждый раз для одной и той же капли.

Планетарные модели атома и ионов лития иллюстрируют дискретность (квантованность) электрических зарядов ④.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА КАПЕЛЬ МАСЛА

Схема экспериментальной установки



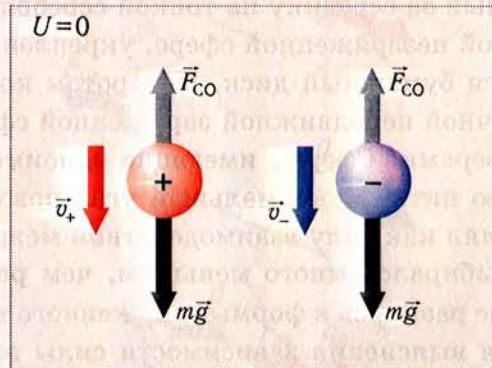
**ЗАРЯД ЛЮБОГО ТЕЛА
КРАТЕН ЗАРЯДУ ЭЛЕКТРОНА**

$$q = Ne$$

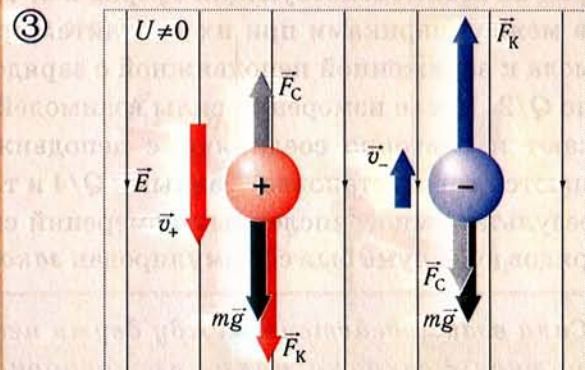
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Силы, действующие на каплю масла:

② $m\vec{g}$ — сила тяжести; $\vec{F}_K$ — сила Кулона;
 $\vec{F}_{co}$ — сила сопротивления воздуха



В отсутствие поля направление и скорость движения капли не зависят от ее заряда

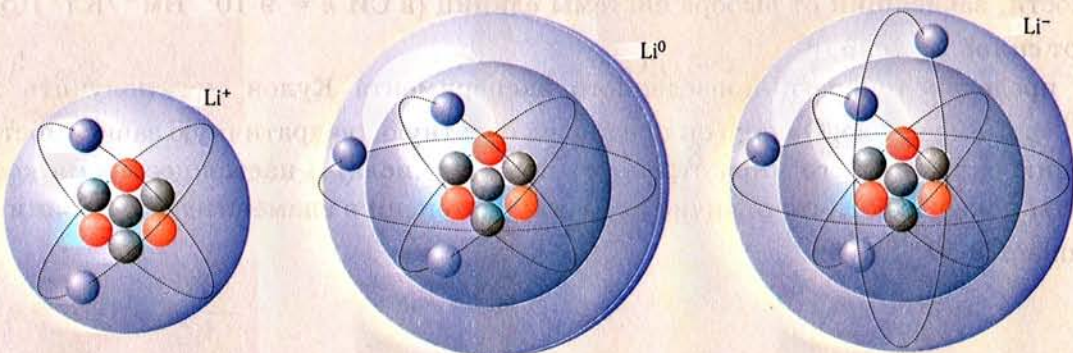


В электрическом поле направление и скорость движения капли зависят от знака и величины ее заряда

④

ПЛАНЕТАРНЫЕ МОДЕЛИ АТОМОВ И ИОНОВ ЛИТИЯ

- — протон
- — нейтрон
- — электрон



§58. ЗАКОН КУЛОНА

Для определения силы взаимодействия точечных зарядов французский ученый *Шарль Кулон* в 1785 г. использовал крутильные весы ①. С помощью подобных весов английский физик Генри Кавендиш тринадцатью годами раньше изучал гравитационное взаимодействие. Основным элементом крутильных весов является легкий изолирующий стержень (коромысло), подвешенный за середину на тонкой серебряной упругой проволоке. В качестве противовеса помещенной незаряженной сфере, укрепленной на одном конце коромысла, на другом конце размещался бумажный диск. Поворотом коромысла сфера приводилась в контакт с совершенно идентичной неподвижной заряженной сферой, в результате чего ее заряд делился поровну между сферами. Сферы, имеющие одноименные заряды, начинали отталкиваться, закручивая упругую нить. Максимальный угол поворота коромысла, фиксируемый по наружной шкале, определял как силу взаимодействия между зарядами, так и расстояние между ними. Диаметр сфер выбирался много меньшим, чем расстояние между сферами ($D \ll r$), чтобы исключить влияние размеров и формы заряженного тела на результаты измерений.

Для выяснения зависимости силы взаимодействия от расстояния нить закручивалась на некоторый угол так, что заряженные сферы сближались. При этом возрастающая сила отталкивания сфер измерялась по углу поворота нити.

Для получения зависимости силы взаимодействия от величины зарядов Ш. Кулон уменьшал заряд на взаимодействующих сферах в 2, 4, 8, ... раз, используя эффект перераспределения зарядов между шариками при их контакте. При первом прикосновении незаряженной сферы коромысла к заряженной неподвижной с зарядом Q на ней заряд на сферах распределяется поровну по $Q/2$. После измерения силы взаимодействия между этими зарядами сферу коромысла разряжают и повторно соединяют с неподвижной сферой. В результате заряды на сферах уменьшаются вдвое, становясь равными $Q/4$ и т. д.

В результате многочисленных измерений силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме был сформулирован *закон Кулона* ②:

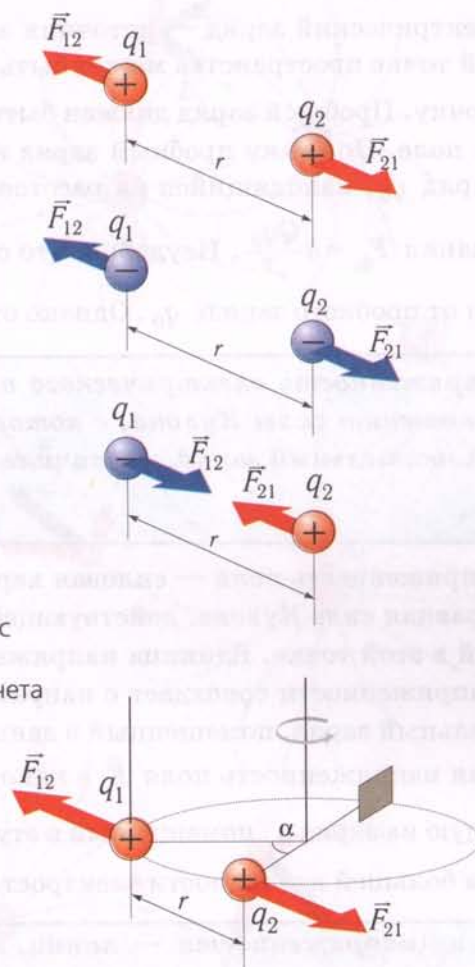
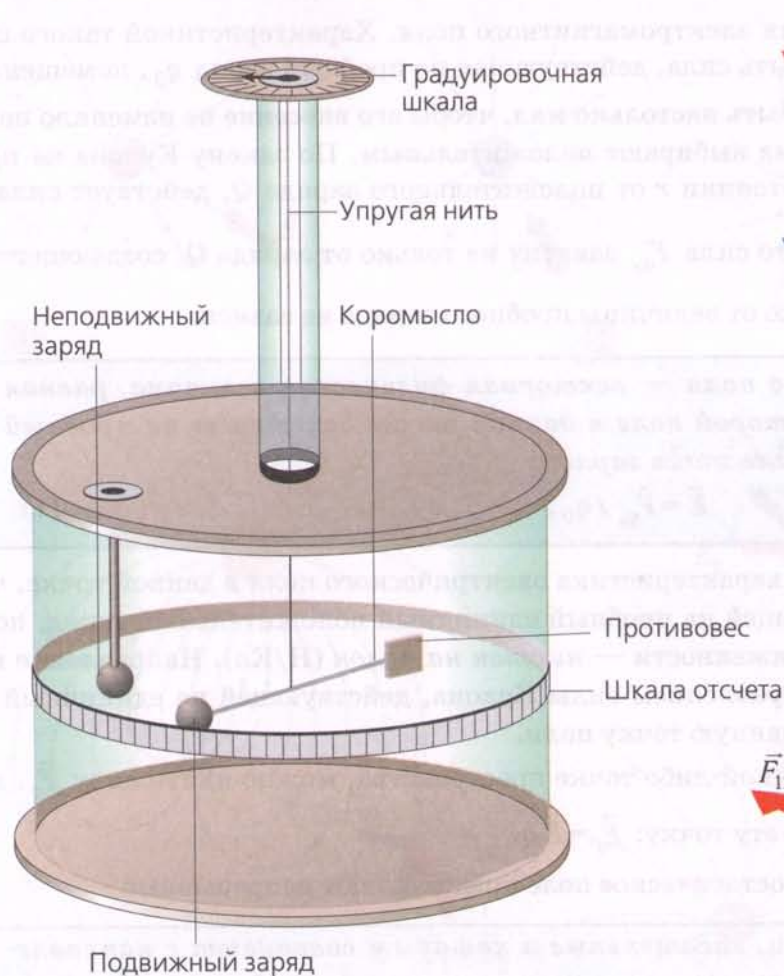
Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по прямой, соединяющей заряды:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где q_1, q_2 — модули зарядов, r — расстояние между зарядами, k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц (в СИ $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Нм}^2/\text{Кл}^2$) ③. Силу F_{12} называют *силой Кулона*.

В пределах точности проведенного эксперимента Кулон мог получить и зависимость $r^{2 \pm 0,001}$ в знаменателе. Однако он предпочел обратную квадратичную зависимость, полагая, что гармонию окружающего мира отражают простые числа. В настоящее время косвенные эксперименты показывают, что отличие показателя степени в знаменателе от двойки очень мало (не превышает $3 \cdot 10^{-16}$).

① ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ С ПОМОЩЬЮ КРУТИЛЬНЫХ ВЕСОВ (1785 г.)



② СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ

Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. В СИ

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

③ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ (фундаментальная физическая постоянная)

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

§59. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрический заряд — источник электромагнитного поля. Характеристикой такого поля в любой точке пространства может быть сила, действующая на пробный заряд q_0 , помещенный в эту точку. Пробный заряд должен быть настолько мал, чтобы его внесение не изменяло исследуемое поле. По знаку пробный заряд выбирают положительным. По закону Кулона на пробный заряд q_0 , находящийся на расстоянии r от положительного заряда Q , действует сила отталкивания $F_{q_0} = k \frac{Qq_0}{r^2}$. Неудобно, что сила F_{q_0} зависит не только от заряда Q , создающего поле, но и от пробного заряда q_0 . Однако от величины пробного заряда не зависит

напряженность электрического поля — векторная физическая величина, равная отношению силы Кулона, с которой поле в данной точке действует на пробный положительный заряд, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \vec{F}_{q_0} / q_0. \quad (1)$$

Напряженность поля — силовая характеристика электрического поля в данной точке, численно равная силе Кулона, действующей на пробный единичный положительный заряд, помещенный в этой точке. Единица напряженности — *ньютон на кулон* (Н/Кл). Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы Кулона, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Зная напряженность поля $\vec{E}$ в какой-либо точке пространства, можно найти силу $\vec{F}_q$, действующую на заряд q , помещенный в эту точку: $\vec{F}_q = \vec{E} q$.

Для большей наглядности электростатическое поле представляют непрерывные

линии напряженности — линии, касательные к которым совпадают с направлением вектора напряженности электростатического поля в данной точке.

Линии напряженности электростатического поля, созданного точечным положительным зарядом, направлены радиально от заряда, так как пробный заряд в любой точке отталкивается от него ①. Линии напряженности электростатического поля, созданного точечным отрицательным зарядом, направлены радиально к заряду ②, так как пробный заряд в любой точке притягивается к нему. Силы, действующие на единичный положительный заряд со стороны других зарядов, не зависят друг от друга ③.

Согласно принципу суперпозиции электростатических полей, напряженность поля системы зарядов в данной точке равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности:

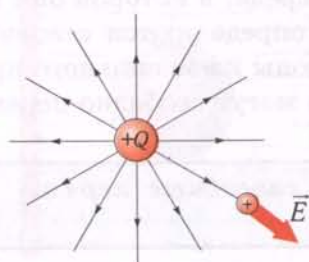
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Например, напряженность электростатического поля, созданного двумя точечными зарядами, равна векторной сумме напряженностей в любой точке пространства ④, ⑤.

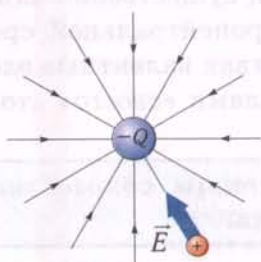
Напряженность поля, созданного точечным положительным зарядом Q , согласно (1) убывает обратно пропорционально квадрату расстояния r от него ⑥:

$$E = k \frac{Q}{r^2}.$$

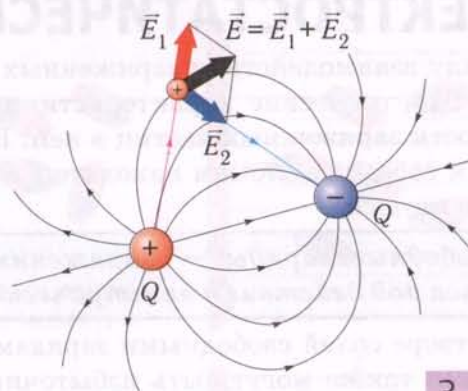
ЛИНИИ НАПРЯЖЕННОСТИ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ



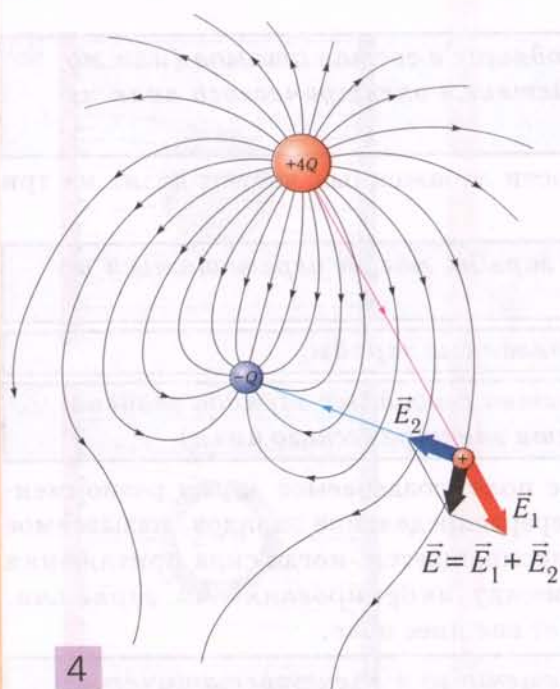
1



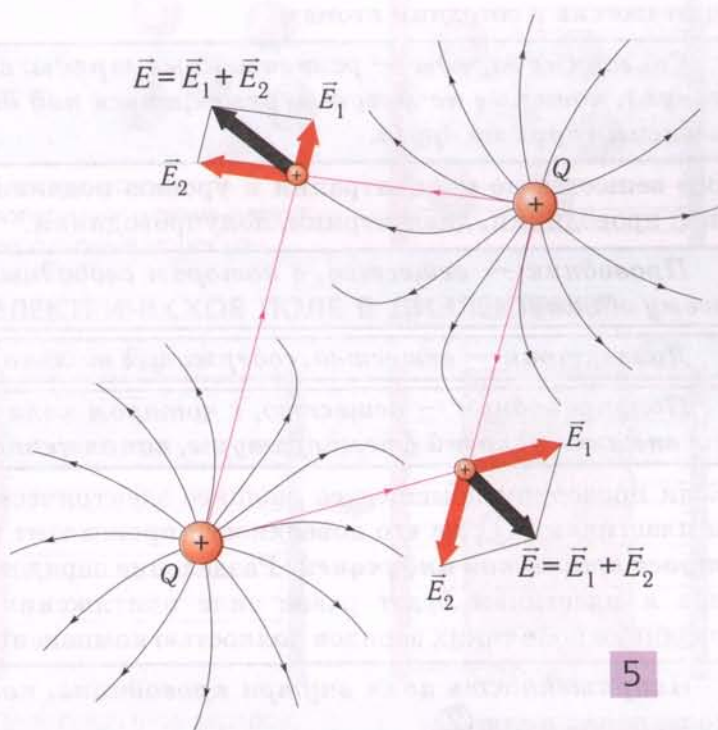
2



3



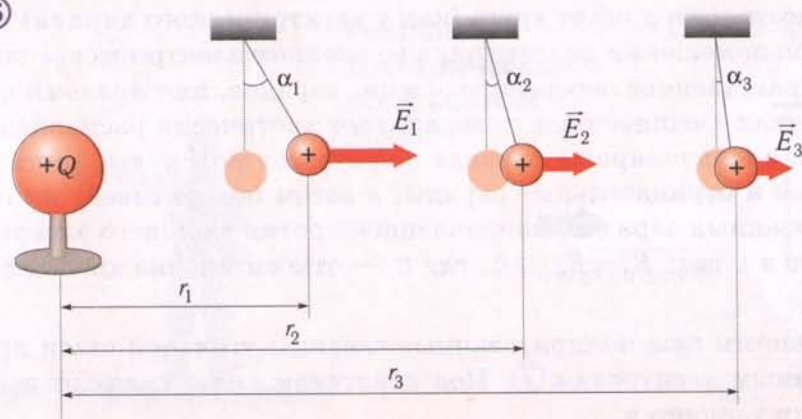
4



5

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТ РАССТОЯНИЯ

⑥



$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

$$E_1 > E_2 > E_3$$

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$$

§60. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

На силу взаимодействия заряженных частиц существенно влияет среда, в которой они находятся. Электрические характеристики электронейтральной среды определяются степенью подвижности заряженных частиц в ней. В металлах валентные электроны из-за сильного притяжения к соседним атомам находятся за пределами «своего» атома и могут свободно перемещаться по металлу.

Свободные заряды — заряженные частицы одного знака, способные перемещаться под действием электрического поля.

В растворе солей свободными зарядами являются положительные и отрицательные ионы. Свободными также могут быть избыточные заряды, сообщенные веществу извне. Валентный электрон связан с атомом, если энергия его притяжения к нему велика по сравнению с энергией его притяжения к соседним атомам.

Связанные заряды — разноименные заряды, входящие в состав атомов (или молекул), которые не могут перемещаться под действием электрического поля независимо друг от друга.

Все вещества по концентрации и уровню подвижности заряженных частиц делят на три группы: проводники, диэлектрики, полупроводники.

Проводник — вещество, в котором свободные заряды могут перемещаться по всему объему.

Диэлектрик — вещество, содержащее только связанные заряды.

Полупроводник — вещество, в котором количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температуры, напряженности электрического поля).

Если проводник помещен во внешнее электрическое поле, создаваемое двумя разноименными пластинами ①, на его поверхности происходит перераспределение зарядов, называемое **электростатической индукцией**. Разделение зарядов прекращается, когда сила притяжения зарядов к пластинам будет равна силе притяжения между **индуцированными зарядами**. В проводнике поле таких зарядов полностью компенсирует внешнее поле.

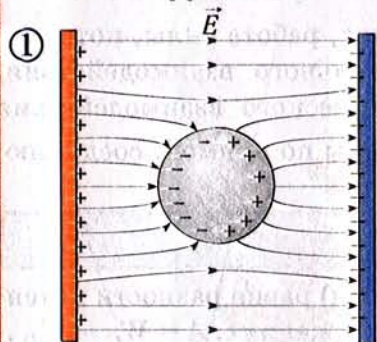
Напряженность поля внутри проводника, помещенного в электростатическое поле, равна нулю ②.

Поэтому металлическая поверхность препятствует проникновению внутрь ее электрического поля, обеспечивая **электростатическое экранирование** ③.

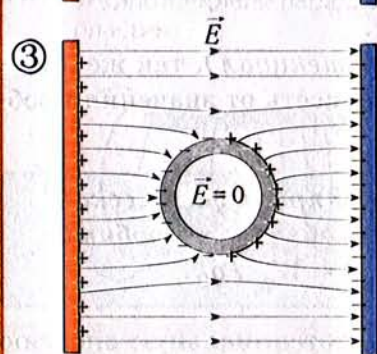
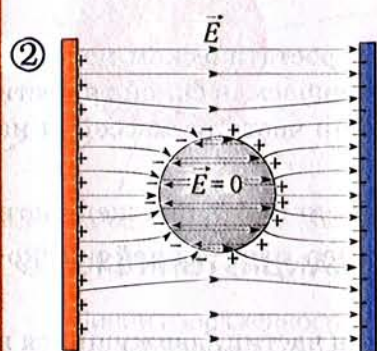
Диэлектрики, в соответствии со структурой молекул, входящих в их состав, делят на **полярные** и **неполярные**. В полярных молекулах центры связанных зарядов (ядер, электронных оболочек) находятся на некотором расстоянии друг от друга (как у электрического диполя) ④, а в неполярных они совпадают ⑤. При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле внутри диэлектрика возникает пространственное перераспределение зарядов, или **поляризация диэлектрика**. В полярных диэлектриках внешнее поле поворачивает хаотически расположенные молекулы вдоль напряженности, а в неполярных сначала поляризует молекулы, растягивая в разные стороны положительные и отрицательные заряды, а затем поворачивает их оси вдоль напряженности поля. Поле связанных зарядов, направленное против внешнего электрического поля в вакууме, ослабляет его в ϵ раз: $E_d = E_{vac} / \epsilon$, где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды ⑥.

В электрическом фильтре для очистки газа поляризованные частицы угольной пыли притягиваются к отрицательно заряженным электродам ⑦. Под действием силы тяжести пыль оседает на дно фильтра и периодически удаляется.

ПРОВОДНИКИ



Напряженность поля внутри проводника равна нулю



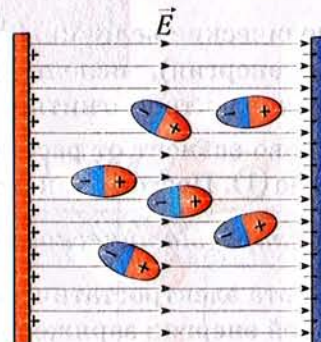
Заряды располагаются на внешней поверхности проводника

ДИЭЛЕКТРИКИ

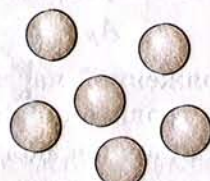
④ Полярные



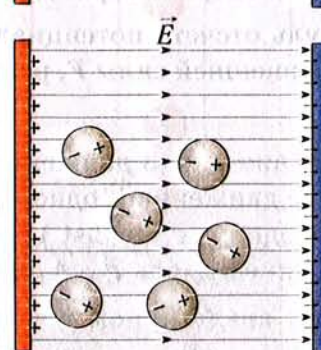
Электрическое поле ориентирует полярные молекулы



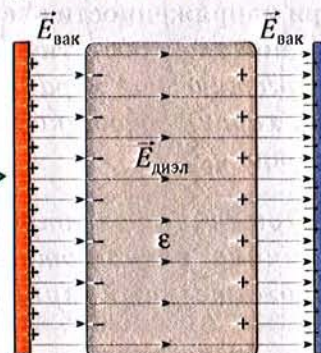
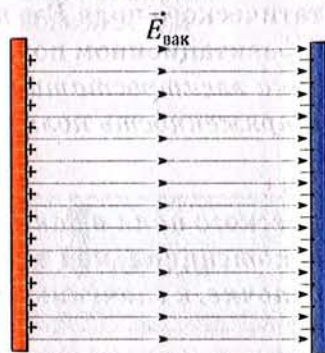
⑤ Неполярные



Электрическое поле поляризует и ориентирует неполярные молекулы

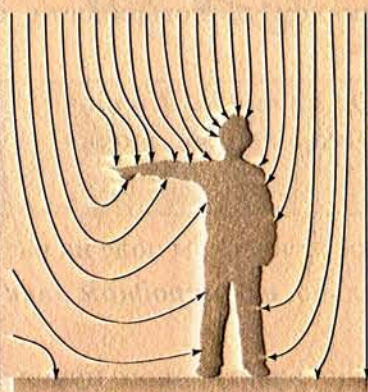


⑥ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

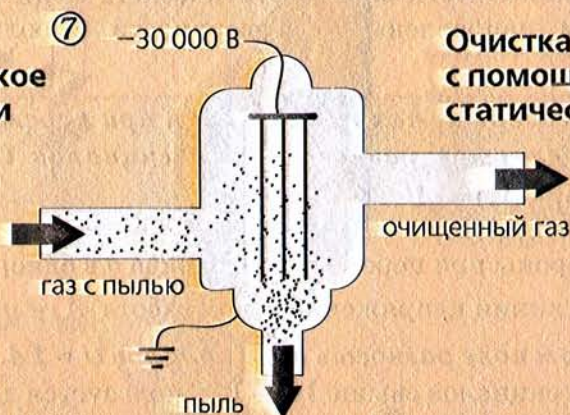


Поле связанных зарядов, направленное против внешнего электрического поля, уменьшает напряженность в ϵ раз

$$E_{\text{диэл}} = \frac{E_{\text{вак}}}{\epsilon}$$



Реальное электрическое поле вблизи Земли



Очистка газа от пыли с помощью электростатического поля

§61. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Физические величины, введенные в механике (перемещение, сила, работа силы, потенциальная энергия), используются при описании любого фундаментального взаимодействия, включая электромагнитное. Силы гравитационного и электростатического взаимодействия одинаково зависят от расстояния между телами ($\sim 1/r^2$) и направлены по прямой, соединяющей тела ①. Поэтому так же, как и гравитационное,

электростатическое поле потенциально.

Работа электростатической силы (как и любой потенциальной силы) равна разности потенциальной энергии заряженной частицы в ее начальном и конечном положениях: $A = W_C - W_D$.

Нуль отсчета потенциальной энергии электростатического поля выбирается произвольно. Работа внешней силы F , равномерно перемещающей заряд q из точки C в точку D , равна

$$A_F = -A = W_C - W_D.$$

Покажем, что движение заряженной частицы в однородном электростатическом поле подобно ее движению в однородном гравитационном поле ②. Работа, совершаемая силой тяжести в однородном ($g = \text{const}$) гравитационном поле Земли при перемещении частицы массой m на расстояние h вдоль $\vec{g}$, $A_g = mgh$.

При аналогичном перемещении положительного заряда $+q$ вдоль линии напряженности однородного ($\vec{E} = \text{const}$) электростатического поля (созданного, например, заряженной плоскостью) совершается работа $A_q = qEh$.

При напряженности электростатического поля $E = mg/q$, ускорения частиц, движущихся в однородном электростатическом и гравитационном полях, совпадают.

Энергетическая характеристика электростатического поля (потенциал), так же как и силовая характеристика поля (напряженность поля), не должна зависеть от значения пробного заряда q_0 .

Потенциал электростатического поля в данной точке — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии, которой обладает пробный положительный заряд в этой точке, к значению этого заряда: $\varphi = W_{q_0} / q_0$.

Единица потенциала — вольт (В). Зная потенциал, легко найти потенциальную энергию заряда в поле заряда: $W_q = q\varphi$.

Эквипотенциальная поверхность — поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение ③.

Линии напряженности электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям и направлены от поверхности с большим потенциалом к поверхности с меньшим ④.

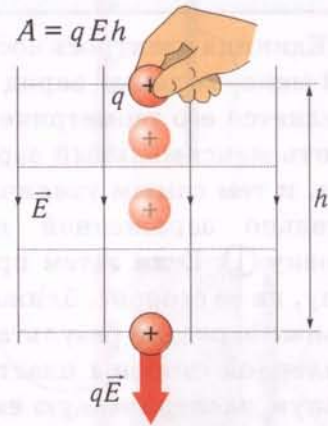
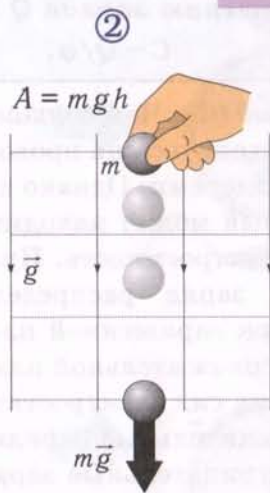
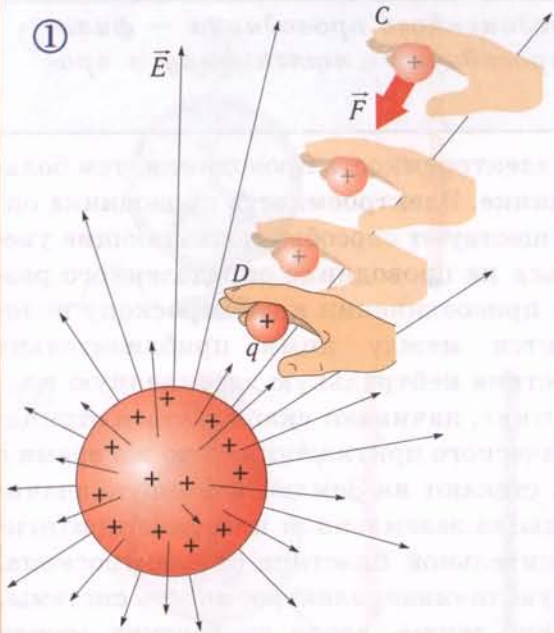
Работа, совершаемая силами поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2, определяется разностью потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$ между этими точками: $A_q = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$.

С другой стороны при перемещении заряда q в однородном электростатическом поле на расстояние d вдоль линии напряженности $\vec{E}$ работа $A_q = qEd$. Следовательно, в однородном электростатическом поле разность потенциалов $U = Ed$.

Разность потенциалов свыше 1000 В используется для формирования электронного пучка в электронно-лучевой трубке ⑤.

РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

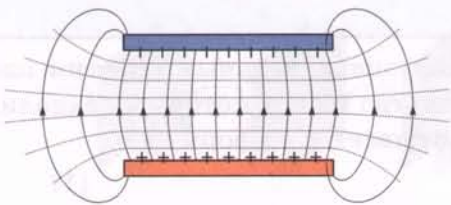
$$A_{CD} = q(\varphi_C - \varphi_D)$$



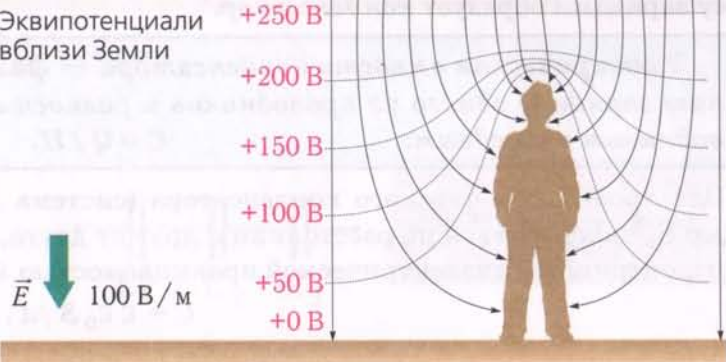
Движение частиц в однородном электрическом поле подобно движению частиц в гравитационном поле

③ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Линии напряженности и эквипотенциали параллельных пластин



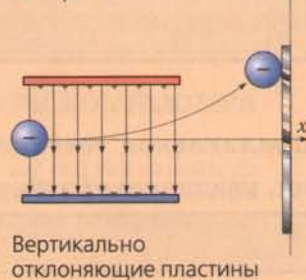
Эквипотенциали вблизи Земли



⑤ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКЕ



Траектория электрона перед попаданием на экран



§62. КОНДЕНСАТОРЫ

Электрическая емкость (электроемкость) уединенного проводника — физическая величина, равная отношению заряда Q проводника к потенциалу φ проводника:

$$C = Q / \varphi.$$

Единица электроемкости — *фарад* (Ф). Чем больше электроемкость проводника, тем больший максимальный заряд может находиться на проводнике. Электроемкость проводника определяется его геометрическими размерами. Однако существуют способы, позволяющие увеличить максимальный заряд, который может находиться на проводнике определенного размера, и тем самым увеличить его электроемкость. При присоединении к электроскопу положительно заряженной пластины заряд распределится между ними приблизительно поровну ①. Если затем придвинуть к заряженной пластине нейтральную заземленную пластину, на ее стороне, ближайшей к положительной пластине, начинают скапливаться отрицательные заряды в результате действия сил электростатического притяжения. В то же время с отдаленной стороны пластины положительные заряды стекают на Землю, имеющую значительную электрическую емкость. Отрицательные заряды на заземленной пластине притягивают дополнительные положительные заряды к положительной пластине от электроскопа. Таким образом, введение дополнительного проводника увеличивает электроемкость системы. Увеличить электроемкость системы двух пластин можно также, вводя диэлектрик между пластинами ②: связанные заряды диэлектрика притягивают дополнительные заряды на пластины. Система заряженных проводников с равными по величине и противоположными по знаку зарядами образует *конденсатор*.

Электрическая емкость конденсатора — физическая величина, равная отношению заряда Q одного из проводников к разности потенциалов U между этим проводником и соседним:

$$C = Q / U.$$

Электроемкость плоского конденсатора (система двух плоскопараллельных пластин площадью S , находящихся на расстоянии d друг от друга, пространство между которыми заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε) рассчитывается по формуле:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d, \quad (1)$$

где электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 1/(4\pi k) = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Нм².

Для получения заданной электроемкости используют различные типы соединения конденсаторов. Для уменьшения электроемкости C используется *последовательное соединение конденсаторов* C_1, C_2 ③, эффективно увеличивающее расстояние между пластинами ④:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2};$$

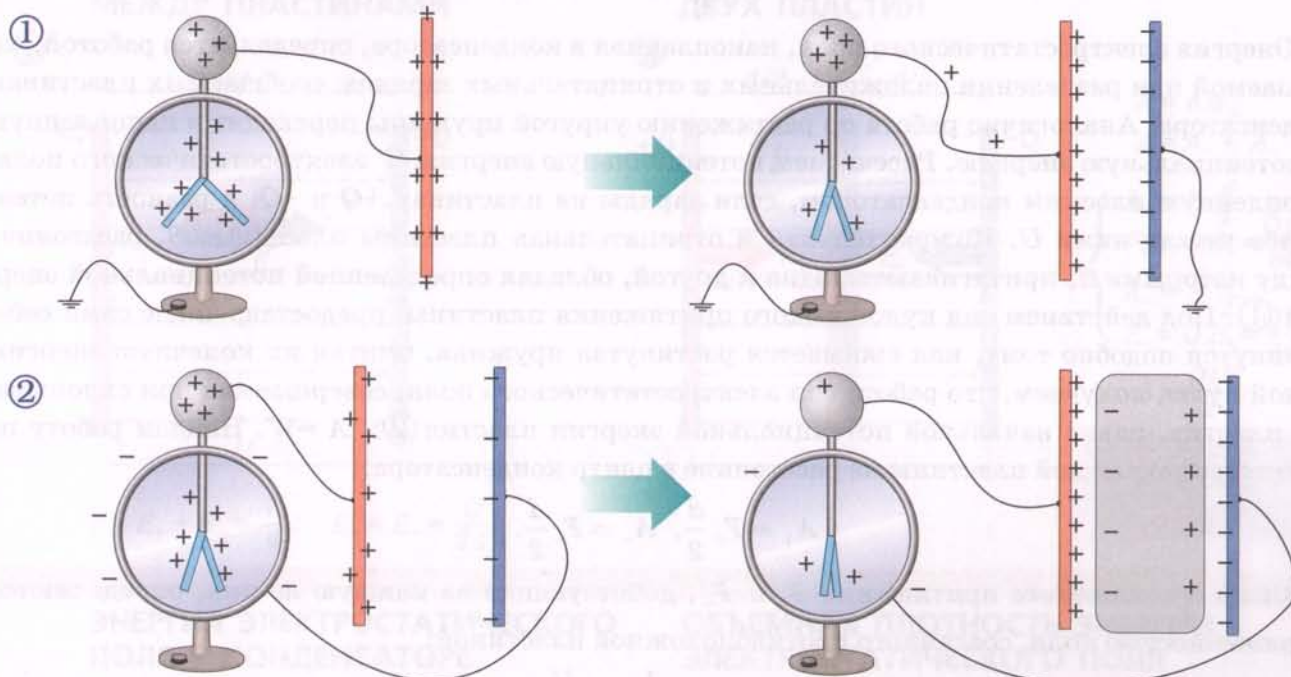
$$C < \{C_1, C_2\}.$$

Параллельное соединение конденсаторов C_1, C_2 , эквивалентное увеличению площади пластин, увеличивает электроемкость системы:

$$C = C_1 + C_2.$$

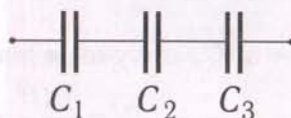
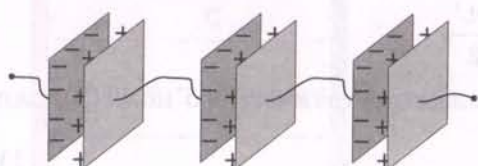
Зависимость электроемкости конденсатора от расстояния между его пластинами используется в схемах кодирования клавиатуры персонального компьютера ⑤. При нажатии на клавишу электроемкость находящегося под ней конденсатора изменяется. Микросхема, подключенная к каждой клавише, при изменении электроемкости выдает кодированный сигнал, соответствующий данной букве.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА В ПРОВОДНИКАХ



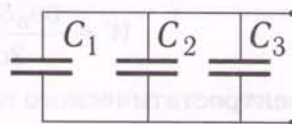
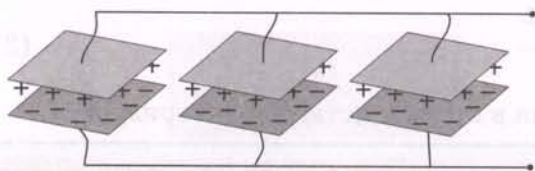
СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

③ Последовательное



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

④ Параллельное

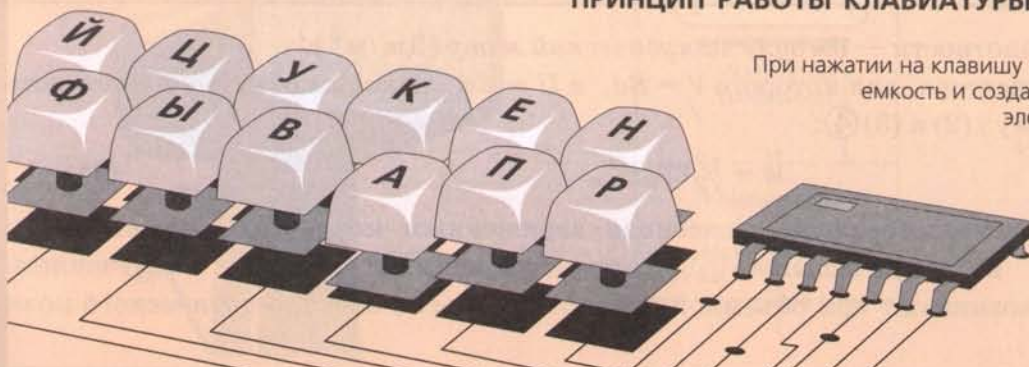


$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

⑤

ПРИНЦИП РАБОТЫ КЛАВИАТУРЫ КОМПЬЮТЕРА

При нажатии на клавишу под ней изменяется емкость и создается определенный электрический сигнал



§63. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Энергия электростатического поля, накопленная в конденсаторе, определяется работой, совершаемой при разделении положительных и отрицательных зарядов, сообщаемых пластинам конденсатора. Аналогично работа по растяжению упругой пружины переходит в накопленную ею потенциальную энергию. Рассчитаем потенциальную энергию W электростатического поля, накопленную плоским конденсатором, если заряды на пластинах $+Q$ и $-Q$, а разность потенциалов между ними U . Положительная и отрицательная пластины площадью S , расстояние между которыми d , притягиваются одна к другой, обладая определенной потенциальной энергией ①. Под действием сил кулоновского притяжения пластины, предоставленные сами себе, схлопнутся подобно тому, как сжимается растянутая пружина. Считая их конечную энергию равной нулю, получаем, что работа сил электростатического поля, совершаемая при схлопывании пластин, равна начальной потенциальной энергии пластин ②: $A = W$. Найдем работу по перемещению каждой пластины на расстояние в центр конденсатора:

$$A_+ = F_+ \frac{d}{2}, \quad A_- = F_- \frac{d}{2}.$$

Силы кулоновского притяжения F_+ и F_- , действующие на каждую из них, определяются напряженностью поля, созданного противоположной пластиной:

$$E_+ = E_- = \frac{1}{2}E = \frac{U}{2d}.$$

Следовательно, $F_+ = F_- = Q \frac{U}{2d}$. Тогда полная работа и потенциальная энергия сил электростатического поля

$$A = A_+ + A_- = W = \frac{QU}{2}.$$

Вводя емкость $C = Q/U$, получаем энергию электростатического поля ③, запасенную в конденсаторе:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}. \quad (1)$$

Для плоского конденсатора, емкость которого $C = \epsilon \epsilon_0 S / d$,

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d}. \quad (2)$$

Концентрацию энергии электростатического поля в пространстве характеризует

объемная плотность энергии — физическая величина, равная отношению энергии электростатического поля, сосредоточенного в объеме, к этому объему:

$$w = W / V. \quad (3)$$

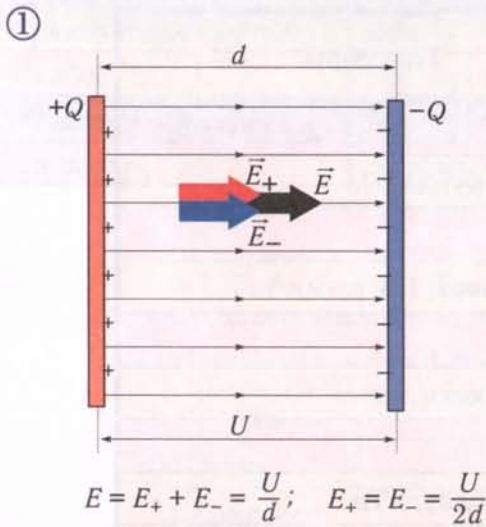
Единица объемной плотности — джоуль на кубический метр ($\text{Дж}/\text{м}^3$).

Для плоского конденсатора, для которого $V = Sd$, а $U = Ed$, находим объемную плотность энергии с помощью формул (2) и (3) ④:

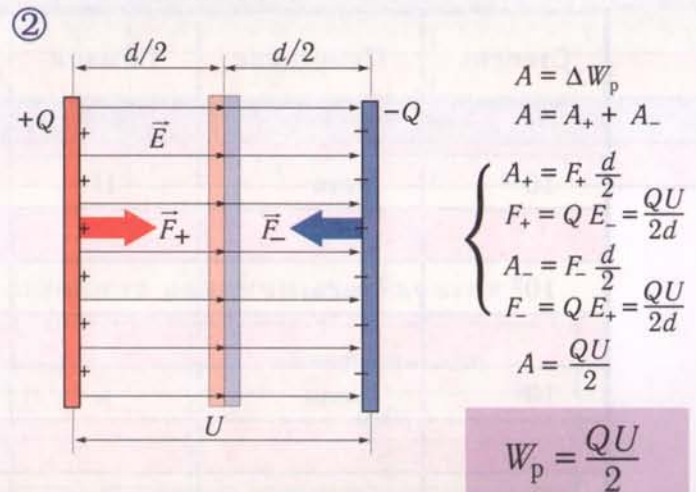
$$w = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2. \quad (4)$$

Энергия электростатического поля, запасенная заряженным конденсатором, вызывает электрический разряд в лампе-вспышке ⑤, сопровождающийся мощным излучением. Атмосферные разряды возникают при объемной плотности энергии электростатического поля $40\text{--}50 \text{ Дж}/\text{м}^3$.

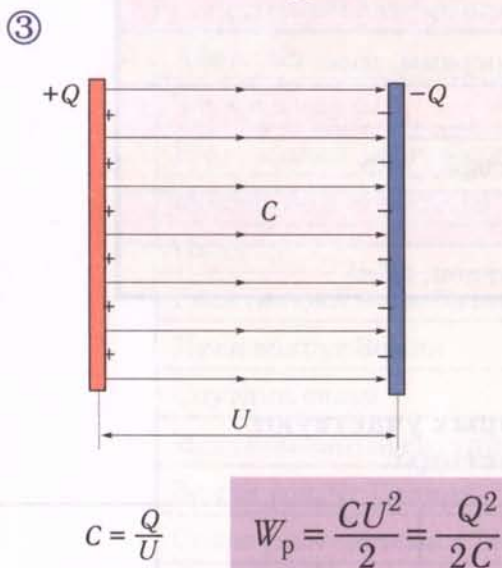
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ



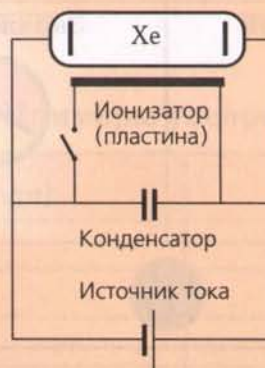
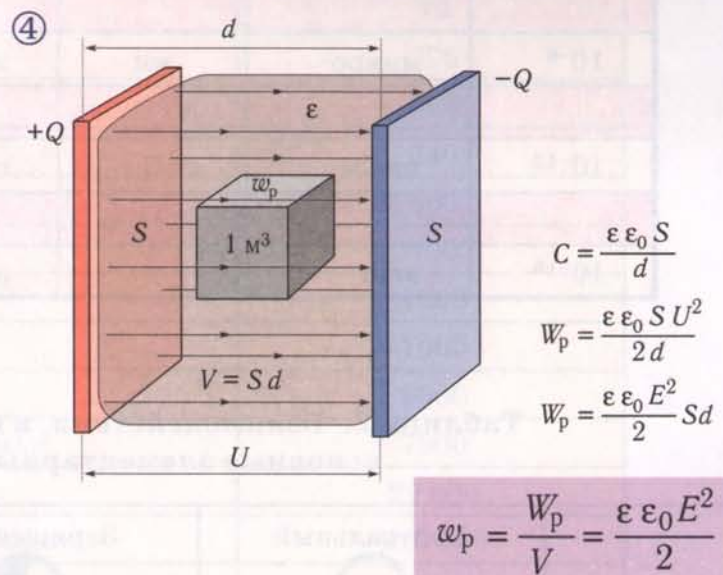
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДВУХ ПЛАСТИН



ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КОНДЕНСАТОРЕ



ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ



ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЛАМПА-ВСПЫШКА

Запасенная в конденсаторе энергия вызывает электрический разряд

Таблица 1. Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Степень	Приставка	Символ	Примеры
10^{18}	экса-	Э	эксаджоуль, ЭДж
10^{15}	пета-	П	петасекунда, Пс
10^{12}	тера-	т	терагерц, ТГц
10^9	гига-	г	гигавольт, ГВ
10^6	мега-	м	мегаватт, МВт
10^3	кило-	к	килограмм, кг
10^2	гекто-	г	гектопаскаль, гПа
10	дека-	да	декатесла, даТл
10^{-1}	деци-	д	децибел, дБ
10^{-2}	санти-	с	сантиметр, см
10^{-3}	милли-	м	миллиметр, мм
10^{-6}	микро-	мк	микрограмм, мкг
10^{-9}	нано-	н	нанометр, нм
10^{-12}	пико-	п	пикофарад, пФ
10^{-15}	фемто-	ф	фемтометр, фм
10^{-18}	атто-	а	аттокулон, аКл

Таблица 2. Взаимодействия, в которых участвуют основные элементарные частицы

Лептоны	Нейтральный  (нейтрино)	Заряженный  (электрон)	Цветовое значение взаимодействий
Адроны	Нейтральный  (нейтрон)	Заряженный  (протон)	Гравитационное  Слабое  Электромагнитное 
Фотон			Сильное 

Таблица 3. Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

Взаимодействие	Взаимодействующие частицы	Радиус действия, м	Относительная интенсивность
Гравитационное	Все	∞	1
Слабое	Все, кроме фотона	10^{-17}	10^{32}
Электромагнитное	Заряженные частицы	∞	10^{36}
Сильное	Адроны	10^{-15}	10^{38}

Таблица 4. Примерная скорость различных объектов

Объект	Скорость, м/с
Муравей	0,01
Пловец	2
Спринтер	11
Автомобиль (в городе)	15
Рыба-парусник	30
Спортивный автомобиль	70
Авиалайнер	270
Звук в воздухе	333
Реактивный автомобиль	340
Молекула в атмосфере	500
Пуля	700
Реактивный истребитель	1000
Луна вокруг Земли	1000
Спутник связи	3000
Искусственный спутник Земли	7900
Земля вокруг Солнца	29 600
Солнечная система в Галактике	210 000
Электрон в атоме водорода	2 000 000
Радиоволны, свет, рентгеновское излучение	300 000 000

Таблица 5. Примеры ускорений

Объект	Ускорение, м/с ²
Электропоезд	0,6
Свободно падающее тело	9,8
Ракета при запуске спутника	60
Пуля в стволе автомата	$6 \cdot 10^5$

Приложение I

Таблица 6. Скорость падения различных тел с большой высоты на Землю

Падающее тело	Скорость падения на Землю, м/с
Перо птицы	0,4
Лист бумаги	0,5
Снежинка	1
Парашютист (раскрытый парашют)	7
Монета	9
Парашютист (нераскрытый парашют)	60
Пуля (крупного калибра)	100
Большой камень	200

Таблица 7. Период вращения вокруг собственной оси Солнца, ближайших планет Солнечной системы и Луны

Небесное тело	Период T ; сут*
Солнце	25,4
Меркурий	58,6
Венера	243
Земля	1
Марс	1,03
Сатурн	0,43
Луна	27,3

Таблица 8. Гравитационное ускорение на планетах Солнечной системы

Планета	Гравитационное ускорение, м/с ²
Меркурий	3,7
Венера	8,9
Земля	9,8
Луна	1,6
Марс	3,7
Юпитер	26
Сатурн	12
Уран	11
Нептун	12
Плутон	2

Таблица 9. Тормозной путь автомобиля на разном дорожном покрытии

Скорость, км/ч	Тормозной путь, м	
	Сухой бетон	Мокрый бетон
40	8	12,5
60	18	28
80	32	50
120	72	112,5

Таблица 10. Коэффициент трения покоя и скольжения для некоторых пар материалов

Материал	m_n	m
Лед — лед	0,05–0,15	0,02
Кожаная обувь — лед	0,1	0,05
Сталь — лед	0,1	0,05
Автошина — лед	0,3	0,02
Кожаная обувь — дерево	0,3	0,2
Дерево — дерево	0,5	0,5
Резина — асфальт	0,6	0,4
Сталь — сталь	0,6	0,4
Кожаная обувь — ковер	0,6	0,5
Автошина — мокрый бетон	0,7	0,5
Стекло — стекло	0,9	0,7
Резиновая обувь — дерево	0,9	0,7
Автошина — сухой бетон	1,0	0,8
Обувь альпиниста — скала	1,0	0,8

Таблица 11. Физиологические эффекты, связанные с перегрузками

Ускорение	$\frac{P}{mg}$	Физиологический эффект
$2g$	3	Движение затруднено
$3g$	4	Ходьба невозможна
$4g - 6g$	5–7	Нарастающая нечеткость зрения, временная потеря зрения

Таблица 12. Некоторые характеристики ближайших планет Солнечной системы

Планета	$r_{\oplus}$, а. е.	T , лет	v_{II} , км/с
Меркурий	0,39	0,24	4,2
Венера	0,72	0,62	10,3
Земля	1,00	1,00	11,2
Марс	1,53	1,88	5,0
Юпитер	5,21	11,9	60,0
Сатурн	9,55	29,5	36,1

Таблица 13. Энергия физических объектов и явлений

Физический объект, явление	Энергия, Дж
Молекула воздуха при комнатной температуре	10^{-21}
Электрон в атоме	10^{-18}
Деление ядра урана	10^{-11}
Протон в ускорителе, прыгающая блоха	10^{-7}
Клавиша компьютера	10^{-2}
Сердцебиение	0,5
Яблоко, падающее с высоты 1 м	1
Горящая спичка	10^3
Взрыв 1 кг тринитротолуола	10^6
Сгорание 1 л бензина	10^7
Сгорание 1 м ³ дров	10^9
Разряд молнии	10^{10}
Космическая ракета	10^{11}
Взрыв атомной бомбы	10^{14}
Ураган	10^{15}
Взрыв водородной бомбы мощностью 100 МВт	10^{17}
Землетрясение (8 баллов по шкале Рихтера)	10^{18}
Извержение вулкана	10^{19}
Солнечное излучение, ежегодно попадающее на Землю	10^{25}
Вращение Земли вокруг оси	10^{29}
Движение Земли вокруг Солнца	10^{33}
Солнечное излучение за год	10^{34}
Взрыв сверхновой звезды	10^{44}
Излучение радиогалактики	10^{55}
Рождение Вселенной	10^{68}

Таблица 14. Замедление хода часов, движущихся со скоростью v

v/c	γ	v/c	γ
0	1	0,9	2,29
0,2	1,02	0,99	7,09
0,4	1,09	0,999	22,37
0,6	1,25	0,9999	70,7
0,8	1,67	0,99999	223,6

Таблица 15. Относительная атомная масса некоторых элементов*

Элемент	Водород	Гелий	Литий	Углерод	Азот	Кислород	Уран
Изотоп	${}^1_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^6_3\text{Li}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{14}_7\text{N}$	${}^{17}_8\text{O}$	${}^{235}_{92}\text{U}$
Относительная атомная масса, а. е. м.	1,0078	4,0026	6,0151	12,0000	14,0031	15,9949	235,0439

Таблица 16. Плотности веществ

Плотности газов приведены при нормальных условиях $\rho = 1,01 \cdot 10^5$ Па, $t = 0^\circ\text{C}$

Вещество	Плотность, кг/м ³	Вещество	Плотность, кг/м ³
Водород	0,09	Магний	$1,7 \cdot 10^3$
Воздух	1,29	Кость	$(1,5 \div 2,0) \cdot 10^3$
Пенопласт	30	Слоновая кость	$(1,8 \div 1,9) \cdot 10^3$
Бальзовое дерево	$0,12 \cdot 10^3$	Глина	$(1,8 \div 2,6) \cdot 10^3$
Пробка	$(0,2 \div 0,3) \cdot 10^3$	Стекло	$(2,4 \div 2,8) \cdot 10^3$
Сосна	$(0,4 \div 0,6) \cdot 10^3$	Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$
Дуб	$(0,6 \div 0,9) \cdot 10^3$	Цемент	$(2,7 \div 3,0) \cdot 10^3$
Эфир	$0,74 \cdot 10^3$	Алмаз	$(3,0 \div 3,5) \cdot 10^3$
Этиловый спирт	$0,79 \cdot 10^3$	Железо	$7,9 \cdot 10^3$
Бензин	$0,88 \cdot 10^3$	Никель	$8,8 \cdot 10^3$
Масло	$0,9 \cdot 10^3$	Медь	$8,9 \cdot 10^3$
Лед	$0,92 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Вода ($3,98^\circ\text{C}$)	$1,00 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Деготь	$1,02 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$
Морская вода	$1,025 \cdot 10^3$	Уран	$18,7 \cdot 10^3$
Кровь	$1,05 \cdot 10^3$	Золото	$19,3 \cdot 10^3$
Резина	$1,2 \cdot 10^3$	Вольфрам	$19,3 \cdot 10^3$
Кирпич	$(1,4 \div 2,2) \cdot 10^3$	Платина	$21,5 \cdot 10^3$
Сахар	$1,6 \cdot 10^3$	Осмий	$22,5 \cdot 10^3$

Таблица 17. Температура кипения для некоторых веществ

Вещество	$t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$
He	-268,9	S	444,6
H ₂	-252,9	Pb	1620
N ₂	-195,8	Ag	1950
O ₂	-182,9	Cu	2336
H ₂ O	100	Au	2600
Hg	356,6	Fe	2750

Приложение I

Таблица 18. Поверхностное натяжение жидкостей, находящихся в контакте с воздухом

Вещество	σ , мН/м
Мыльный раствор	25
Бензин	28,9
Оливковое масло	32,0
Глицерин	63,1
Вода	72,8
Ртуть	465

Таблица 19. Температура плавления для некоторых веществ

Вещество	$t_{пл}$, °C
He	-269,6
H ₂	-259,3
O ₂	-218,8
N ₂	-209,9
Hg	-38,9
H ₂ O	0
S	119
Pb	327,3
Ag	960,8
Au	1063
Cu	1083

Таблица 20. Модуль Юнга для некоторых металлов

Вещество	E , Па
Pb	$0,16 \cdot 10^{11}$
Al	$0,7 \cdot 10^{11}$
Cu	$1,1 \cdot 10^{11}$
Fe	$1,9 \cdot 10^{11}$
Ni	$2,1 \cdot 10^{11}$
W	$3,6 \cdot 10^{11}$

Таблица 21. Предел прочности при растяжении и сжатии

Материал	Растяжение, МПа	Сжатие, МПа
Бетон	4	30–40
Кирпич	5,5	10–21
Мрамор	10	110
Гранит	20	240
Железо	170	650
Кость	110	150

Таблица 22. Уровень интенсивности различных звуков

Источник звука	Уровень интенсивности, дБ
Порог слышимости	0
Шорох листьев	10
Мурлыканье кошки	15
Шепот	20
Комната в городе	40
Офис	50
Разговор (на расст. 1 м)	60
Кабина автомобиля	70
Громкая музыка	80
Улица города	80
Громкий крик (на расст. 1,5 м)	100
Проходящий поезд метро	100
Отбойный молоток	110
Рок-концерт	120
Реактивный двигатель самолета	140
Космическая ракета	180

Таблица 23. Характерные значения напряженности электростатического поля

Источник электростатического поля	Напряженность поля, Н/Кл
Фоновое излучение космического пространства	$3 \cdot 10^{-6}$
Электропроводка	10^{-2}
Радиоволны	10^{-1}
Электрические часы	1,5
Стереосистема	10
Гелий-неоновый лазер	100
Атмосфера (ясная погода)	150
Брызги воды в душе	800
Солнечный свет	10^3
Гроза	10^4
Пробой воздуха	$3 \cdot 10^6$
Мембрана клетки	10^7
Импульсный лазер	$5 \cdot 10^{11}$
Протон в атоме водорода	$6 \cdot 10^{11}$
Поверхность пульсара	10^{14}
Поверхность ядра урана	$2 \cdot 10^{21}$

- Абсолютно твердое тело 46
- Абсолютный нуль
 - температуры 70
- Агрегатные состояния
 - вещества 64
- Адиабата 86
- Адиабатный процесс 86
- Акустика 110
- Амплитуда колебаний 18
- Аннигиляция 60
- Баллистика 14
- Вес тела 26
- Волна гармоническая 104
 - звуковая 110
 - инфразвуковая 110
 - линейно-поляризованная 104
 - механическая 100
 - поперечная 100
 - продольная 100
 - сейсмическая 102
 - стоячая поперечная 108
 - ультразвуковая 110
- Волновой процесс 100
- Второй закон термодинамики 90
- Высота звука 110
- Громкость звука 114
- Движение аperiодическое 42
 - броуновское 90
 - вращательное 48
 - — (условие равновесия) 48
 - механическое 6
 - поступательное 46
 - — (условие равновесия) 46
 - прямолинейное равномерное 8
 - — равноускоренное 10
 - — равнозамедленное 10
 - — равнопеременное 10
- Диффузия 90
- Диэлектрик 124
- Длина волны 104
- Закон Бойля-Мариотта 74
 - всемирного тяготения 22
 - Гей-Люссака 76
 - Гука 26
 - колебательного движения 18
 - Кулона 120
 - Ньютона первый 20
 - — второй 20
 - — третий 20
 - равнопеременного движения 12
 - сохранения заряда 116
 - — импульса 13
 - — механической энергии 15
 - Шарля 78
- Замедление времени 56
- Замкнутый цикл 88
- Зарядовое число 62
- Идеальный газ 66
- Изменение внутренней энергии 80
- Изопроцесс 74
- Изобара 76
- Изотерма 74
- Изохора 78
- Изотоп 62
- Импульс силы 30
 - тела 30
- Интенсивность звука 114
- Ионизация 64
- Испарение 92
- Капиллярность 96
- Кварки 62
- Кипение 94
- Колебания вынужденные 44
 - гармонические 18
 - затухающие 42
 - свободные 40
- Колебательное движение 18
- Количество теплоты 84
- Конденсатор 128
- Конденсация 92
- «Красное смещение» 112
- Кристаллизация 94
- Кристаллическая решетка 98
- КПД теплового двигателя 88
- Линии напряженности
 - электрического поля 122
- Макросостояние системы 66
- Максимальная дальность
 - полета 14
- Масса тела 20
- Массовое число 62
- Материальная точка 6
- Мениск 96
- Микросостояние системы 66
- Моды колебаний 108
- Момент силы 48
- Монокристалл 98
- Мощность 32
- Напряженность электрического
 - поля 122
- Нейтрон 62
- Одновременность событий 54
- Опыт Милликаена 118
 - Штерна 68
- Основное уравнение МКТ 72
- Отражение волн 106
- Пар 92
 - насыщенный 92
- Первый закон
 - термодинамики 84
- Перемещение 6
- Период вращения 16
 - колебаний 40
- Периодическое движение 16
- Плавление 94
- Плоскость поляризации 104
- Поляризатор 104
- Поляризация 104
- Постулат СТО первый 52
 - — второй 52
- Плазма 64
- Плечо силы 48
- Поверхностная энергия 96
- Поверхностное натяжение 96
- Поликристалл 98
- Полиморфизм 98
- Полупроводник 124
- Порог слышимости 114

- Порядок следования событий 54
- Потенциал электростатического поля 126
- Проводник 124
- Протон 62
- Процесс адиабатный 86
 - изобарный 76
 - изотермический 74
 - необратимый 90
 - обратимый 90
- Принцип минимума потенциальной энергии 34
 - суперпозиции сил 20
 - — электрических полей 122
- Путь 6
- Пучности стоячей волны 108
- Работа 32
 - , совершаемая газом 82
- Равновесие безразличное 34
 - устойчивое 34
 - неустойчивое 34
- Радиус Шварцшильда 52
- Разность потенциалов 126
- Реактивное движение 30
- Резонанс 44
- Резонансная кривая 44
- Релятивистский закон сложения скоростей 58
- Рождение электрон-позитронной пары 60
- Свободные заряды 124
- Связанные заряды 124
- Сила 20
 - Кулона 120
 - натяжения 26
 - нормальной реакции опоры 26
 - поверхностного натяжения 96
 - потенциальная 32
 - трения 28
 - тяжести 24
 - упругости 26
- Система тел замкнутая 30
 - — консервативная 34
- Скорость космическая первая 38
 - — вторая 38
 - механической волны 100
 - мгновенная 8
 - наиболее вероятная 68
 - относительная 8
 - при колебательном движении 18
 - средняя путевая 8
- Смачивание 96
- Собственное время 56
- Событие 54
- Соединение конденсаторов последовательное 128
 - — параллельное 128
- Специальная теория относительности (СТО) 52
- Статика 46
- Статическое смещение 42
- Строение атома 62
- Тембр звука 114
- Температура абсолютная 70
 - кипения 94
 - критическая 92
- Температурная шкала абсолютная 70
 - — Фаренгейта 70
 - — Цельсия 70
- Теплообмен 80
- Теорема о кинетической энергии 34
- Тепловой двигатель 88
- Теплоизолированная система 86
- Теплообмен 80
- Термодинамика 80
- Точка поворота 40
- Трение качения 28
 - покоя 28
 - скольжения 28
- Удар абсолютно упругий 36
 - — неупругий 36
- Удельная теплота парообразования 94
 - — плавления 94
- Угловая скорость 16
- Угол смачивания 96
- Узлы стоячей волны 108
- Уравнение Клапейрона — Менделеева 72
- Уровень интенсивности звука 114
- Ускорение 10
 - касательное 10
 - при колебательном движении 18
 - свободного падения 24
 - центростремительное 10
- Условие равновесия для вращательного движения 48
 - — — поступательного движения 46
- Условия идеальности газа 72
- Фаза вращения 16
- Фазовый переход 94
- Фарад 128
- Флуктуации 66
- Центр масс 50
 - тяжести 50
- Цикл Карно 88
- Частота вращения 16
- Черная дыра 12
- Электризация тел 116
- Электрическая емкость 128
- Электрический заряд 116
- Электростатическая индукция 124
- Электростатическое экранирование 124
- Энергия 34
 - внутренняя 80
 - кинетическая 34
 - механическая 34
 - покоя 34
 - потенциальная 34
 - электростатического поля 130
- Эффект Доплера 112

Бойль Роберт 24



Гей-Люссак Жозеф 76



Доплер Иоганн 112



Жолио-Кюри Ирен 60



Жолио-Кюри Фредерик 60



Кавендиш Генри 22



Карно Сади 88



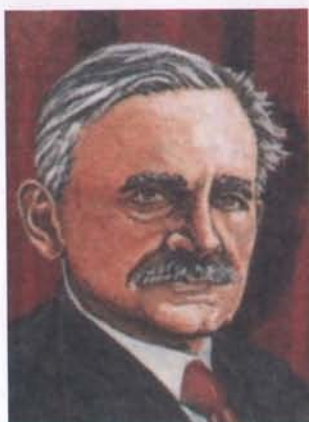
Клапейрон Бенуа 72



Кулон Шарль 120



Майкельсон Альберт 52



Мариотт Эдм 74



Менделеев Дмитрий И. 72



Милликен Роберт 118



Морли Эдуард 52



Ньютон Исаак 20



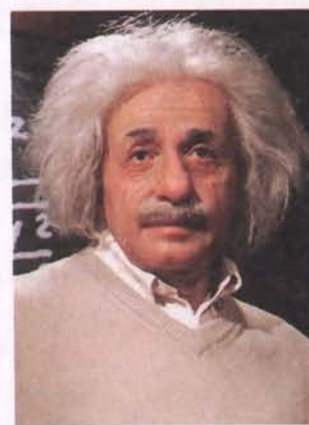
Шарль Жак 78



Штерн Отто 68



Эйнштейн Альберт 52



Учебное издание

Касьянов Валерий Алексеевич

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ АТЛАС ПО ФИЗИКЕ 10 класс

Издательство «ЭКЗАМЕН»

Гигиенический сертификат
№ 77.99.60.953.Д.000454.01.09 от 27.01.2009 г.

Главный редактор *Д.В. Яновский*
Художественный редактор *Л.В. Демьянова*
Технический редактор *Т.В. Фатюхина*
Корректор *И.В. Русанова*
Дизайн обложки *Л.В. Демьянова*
Компьютерная верстка *Т.Н. Меньшова*

105066, Москва, ул. Нижняя Красносельская, д. 35, стр. 1.

www.examen.biz

Е-mail: по общим вопросам: info@examen.biz;
по вопросам реализации: sale@examen.biz
тел./факс 641-00-30 (многоканальный)

Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, том 2; 953005 — книги, брошюры, литература учебная

Отпечатано по технологии СтР в
ОАО «Печатный двор» им. А.М. Горького
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15

По вопросам реализации обращаться по тел.: 641-00-30 (многоканальный).

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ

МЕХАНИКА

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Длина	l метр М
Площадь	S квадратный метр m^2
Объем	V кубический метр m^3
Время	t секунда с
Скорость	v метр в секунду м/с
Ускорение	a метр на секунду в квадрате м/с ²
Частота	ν герц Гц 1/с
Угловая скорость	ω радиан в секунду рад/с рад/с
Масса	m килограмм кг
Плотность	ρ килограмм на кубический метр кг/м ³
Сила	F ньютон Н кг·м/с ²
Импульс	p килограмм-метр в секунду кг·м/с
Давление	p паскаль Па кг/(м·с ²)
Работа	A джоуль Дж кг·м ² /с ²
Мощность	N ватт Вт кг·м ² /с ³
Момент силы	M ньютон-метр Н·м кг·м ² /с ²

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Гравитационная постоянная	G 6,672 · 10 ⁻¹¹ Н·м ² /кг ²
Масса электрона	m_e 9,109 · 10 ⁻³¹ кг
Масса протона	m_p 1,673 · 10 ⁻²⁷ кг
Масса нейтрона	m_n 1,675 · 10 ⁻²⁷ кг

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Количество теплоты	Q джоуль Дж кг·м ² /с ²
Внутренняя энергия	U джоуль Дж кг·м ² /с ²
Удельная теплоемкость	c джоуль на килограмм-кельвин Дж/(кг·К) м ² /(с ² ·К)
Удельная теплота плавления	λ джоуль на килограмм Дж/кг м ² /с ²
Удельная теплота парообразования	r джоуль на килограмм Дж/кг м ² /с ²
Поверхностное натяжение	σ ньютон на метр Н/м кг/с ²

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Атомная единица массы	$a.e.m.$ 1,661 · 10 ⁻²⁷ кг
Постоянная Больцмана	k 1,38 · 10 ⁻²³ Дж/кг
Постоянная Авогадро	N_A 6,02 · 10 ²³ моль ⁻¹
Молярная газовая постоянная	R 8,314 Дж/(моль·К)



ЭЛЕКТРОСТАТИКА

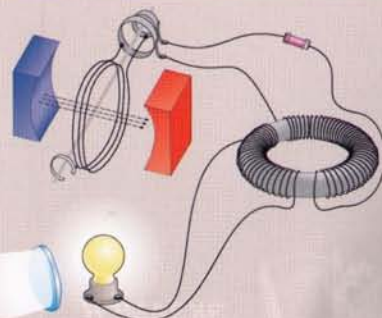
ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Электрический заряд	Q кулон Кл А·с
Поверхностная плотность заряда	σ кулон на квадратный метр Кл/м ² А·с/м ²
Объемная плотность заряда	ρ кулон на кубический метр Кл/м ³ А·с/м ³
Напряженность электростатического поля	E ньютон на кулон Н/Кл кг·м/(А·с ³)
Потенциал	ϕ вольт В кг·м ² /(А·с ³)
Электрическая емкость	C фарад Ф А ² ·с ⁴ /(кг·м ²)
Объемная плотность энергии электростатического поля	w джоуль на кубический метр Дж/м ³ кг/(м·с ²)

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Заряд электрона	e 1,602 · 10 ⁻¹⁹ Кл
Электрическая постоянная	ϵ_0 8,854 · 10 ⁻¹² Кл ² /(Н·м ²)
Постоянная Фарадея	F 9,648 · 10 ⁴ Кл/моль
Магнитная проницаемость вакуума	μ_0 4π · 10 ⁻⁷ Вб/(А·м)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Электрическое сопротивление	R ом Ом кг·м ² /(А ² ·с ³)
Удельное сопротивление	ρ ом-метр Ом·м кг·м ³ /(А ² ·с ³)
Плотность электрического тока	j ампер на квадратный метр А/м ² А/м ²
Магнитная индукция	B тесла Тл кг/(А·с ²)
Магнитный поток	Φ вебер Вб кг·м ² /(А·с ²)
Индуктивность	L генри Гн кг·м ² /(А ² ·с ²)
Взаимная индуктивность	M генри Гн кг·м ² /(А ² ·с ²)
Оптическая сила	D диоптрия дптр м ⁻¹

ВЕЛИЧИНА	ЕДИНИЦА
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Скорость света в вакууме	c 2,998 · 10 ⁸ м/с
Постоянная Планка	h 6,626 · 10 ⁻³⁴ Дж·с



"Иллюстрированный Атлас по физике" – уникальное учебное пособие, не имеющее аналогов в мировой и отечественной учебной литературе, сочетающее достоинства интересного, доказательного учебника и красочного альбома наглядных иллюстраций, помогающих глубже понять суть физических явлений и легче запомнить их взаимосвязи.

"Иллюстрированный Атлас по физике" может использоваться как основное учебное пособие для изучения физики на базовом уровне.

Простота и лаконичность изложения курса физики 10 класса делает «Иллюстрированный Атлас по физике» незаменимым при подготовке к контрольным работам, экзаменам и ЕГЭ.

«Атлас» можно использовать совместно с любым УМК, а также как раздаточный материал к учебным таблицам по физике КПСО «СПЕКТР», содержательно включенным в состав «Атласа» к комплектам:

- **Физика. 10 класс. Арт. 5-8591-016**
- **Физика. Кинематика и динамика материальной точки. Арт. 5-8547-012**
- **Физика. Законы сохранения. Динамика периодического движения. Арт. 5-8546-008**
- **Физика. Статика. Специальная теория относительности. Арт. 5-8664-008**
- **Физика. Молекулярно-кинетическая теория. Арт. 2-090-649**
- **Физика. Термодинамика. Арт. 2-090-661**
- **Физика. Механические волны. Акустика. Арт. 5-8665-008**
- **Физика. Электростатика. Арт. 2-090-677**

ISBN 978-5-377-02830-7



9 785377 028307



ЭКЗАМЕН