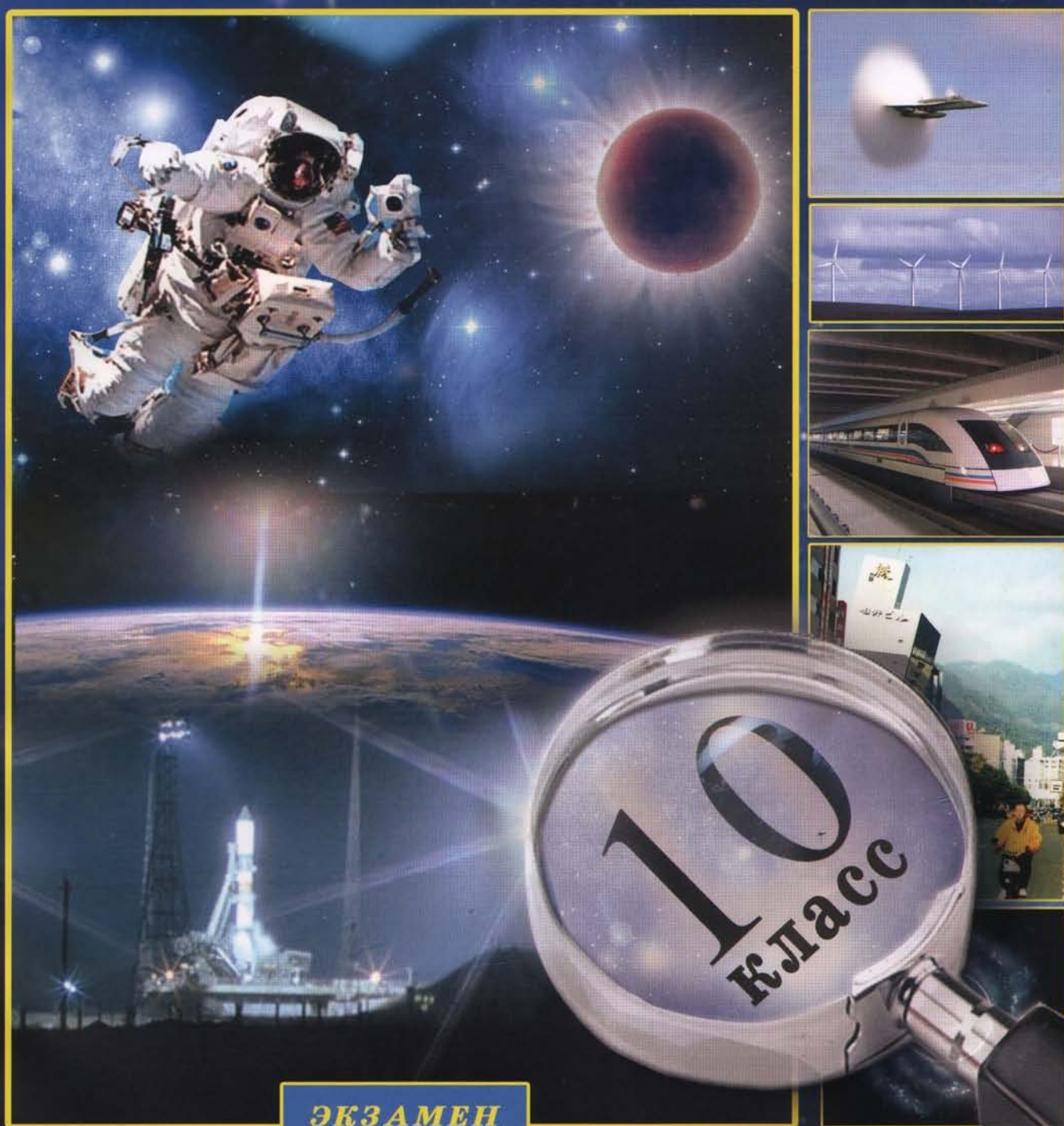


В.А. Касьянов

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ

АТЛАС

ПО ФИЗИКЕ



ЭКЗАМЕН

СИСТЕМА СИ

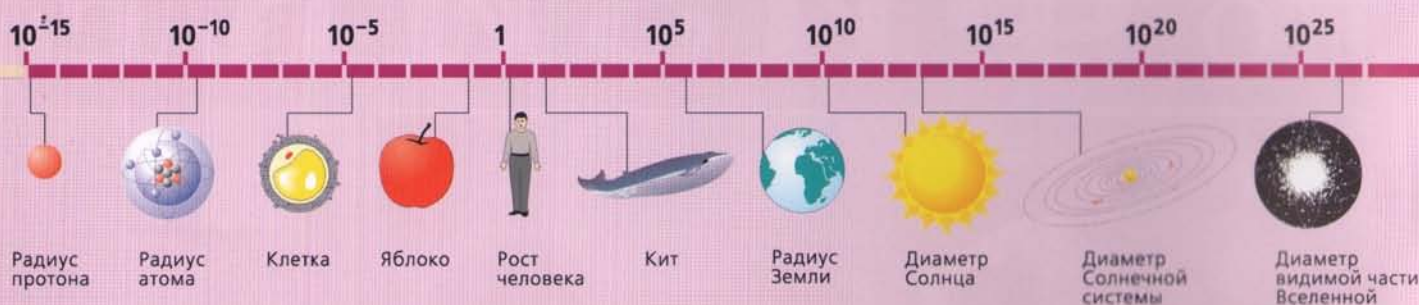
ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА		ЕДИНИЦА	
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Длина	l	метр	м
Время	t	секунда	с
Масса	m	килограмм	кг
Количество вещества	ν	моль	моль
Термодинамическая температура	T	кельвин	К
Сила электрического тока	I	ампер	А
Сила света	I_e	кандела	кд

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА		ЕДИНИЦА	
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Плоский угол	α	радиан	рад
Телесный угол	Ω	стерадиан	ср

ДЛИНА, м



ВРЕМЯ, с



МАССА, кг



ТЕМПЕРАТУРА, К



В.А. Касьянов

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ

АТЛАС

по ФИЗИКЕ

*Рекомендовано
Российской Академией
Образования*



**Издательство
ЭКЗАМЕН
Москва**

УДК 373:53(083.4)

ББК 22.3я72

К28

Касьянов, В.А.

К28 Иллюстрированный Атлас по физике: 10 класс / В.А. Касьянов. — М.: Издательство «Экзамен», 2010. — 144 с.

ISBN 978-5-377-02830-7

«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.

«Иллюстрированный Атлас по физике. 10 класс» содержит следующие разделы: Механика (классическая и релятивистская), Молекулярная физика и Термодинамика, Электростатика.

УДК 373:53(083.4)

ББК 22.3я72

Формат 60х90/8. Гарнитура «Школьная». Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 5,72.

Усл. печ. л. 18. Тираж 10 000 экз. Заказ № 16925.

ISBN 978-5-377-02830-7

© Касьянов В.А., 2010

© Издательство «ЭКЗАМЕН», 2010

Введение	5
----------------	---

МЕХАНИКА

Глава 1. Кинематика материальной точки

§1. Закон движения. Перемещение	6
§2. Скорость. Равномерное прямолинейное движение	8
§3. Ускорение	10
§4. Равнопеременное движение. График зависимости пути, перемещения, скорости и ускорения от времени	12
§5. Баллистическое движение	14
§6. Кинематика вращательного движения	16
§7. Кинематика колебательного движения	18

Глава 2. Динамика материальной точки

§8. Законы Ньютона	20
§9. Закон всемирного тяготения	22
§10. Сила тяжести	24
§11. Сила упругости, вес тела	26
§12. Сила трения	28

Глава 3. Законы сохранения

§13. Закон сохранения импульса	30
§14. Работа силы	32
§15. Потенциальная энергия	34
§16. Абсолютно неупругое и абсолютно упругое столкновения	36

Глава 4. Динамика периодического движения

§17. Движение тела в гравитационном поле	38
§18. Динамика свободных колебаний	40
§19. Колебательная система под действием внешних сил, не зависящих явно от времени	42
§20. Вынужденные колебания. Резонанс	44

Глава 5. Статика

§21. Условие равновесия для поступательного движения	46
§22. Условие равновесия для вращательного движения	48
§23. Центр масс	50

Глава 6. Релятивистская механика

§24. Постулаты специальной теории относительности	52
§25. Относительность времени	54
§26. Замедление времени	56
§27. Релятивистский закон сложения скоростей	58
§28. Взаимосвязь энергии и массы	60

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава 7. Молекулярная структура вещества

§29. Строение атома	62
§30. Агрегатные состояния тел	64

Оглавление

Глава 8. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа	
§31. Распределение молекул идеального газа в пространстве	66
§32. Распределение молекул идеального газа по скоростям. Опыт Штерна	68
§33. Шкалы температур	70
§34. Уравнение состояния идеального газа	72
§35. Изотермический процесс. Закон Бойля-Мариотта	74
§36. Изобарный процесс. Закон Гей-Люссака	76
§37. Изохорный процесс. Закон Шарля	78
Глава 9. Термодинамика	
§38. Внутренняя энергия	80
§39. Работа газа в термодинамике	82
§40. Первый закон термодинамики	84
§41. Адиабатный процесс	86
§42. Цикл Карно	88
§43. Второй закон термодинамики	90
Глава 10. Жидкость и пар	
§44. Сжижение пара при его изотермическом сжатии	92
§45. Испарение. Кипение. Плавление	94
§46. Поверхностное натяжение. Капиллярность	96
Глава 11. Твердое тело	
§47. Кристаллические тела	98
Глава 12. Механические волны. Акустика	
§48. Волновой процесс. Продольные волны	100
§49. Поперечные волны	102
§50. Периодические волны	104
§51. Отражение волн	106
§52. Стоячие волны	108
§53. Звуковые волны. Высота звука	110
§54. Эффект Доплера	112
§55. Тембр. Громкость звука	114

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 13. Силы электростатического взаимодействия неподвижных зарядов	
§56. Электризация тел	116
§57. Опыт Милликана	118
§58. Закон Кулона	120
§59. Напряженность электростатического поля	122
§60. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле	124
Глава 14. Механические волны. Акустика	
§61. Потенциал электростатического поля	126
§62. Конденсаторы	128
§63. Энергия электростатического поля	130
Приложение I. Таблицы значений физических величин	132
Приложение II. Предметный указатель	140
Приложение III. Именной указатель	142

ВВЕДЕНИЕ

Достижения и прогресс современной технологической цивилизации базируются прежде всего на достижениях физики — науки, определившей возникновение и совершенствование машин и механизмов, источников энергии и излучения, средств связи и компьютерной техники.

Исследуя и формулируя наиболее общие и фундаментальные закономерности в природе, физика смогла объяснить и описать количественно множество природных явлений.

Главная цель настоящего издания — представить физику интересной, наглядной, легко запоминающейся и аргументированной.

Отличительная особенность «Иллюстрированного атласа по физике» — наглядное представление физических явлений и принципа действия современных технических устройств с кратким объяснением физических законов, лежащих в их основе.

Иллюстративный материал помогает глубже понять и легче запомнить суть физического явления.

Доказательность, аргументированность изложения базируется на простых математических методах и легко запоминающихся качественных оценках.

В «Иллюстрированном атласе по физике» приведены таблицы основных физических величин, их единиц, диапазон их изменения, значения фундаментальных физических констант, 3-D-карты астрономических структур.

Простота и лаконичность изложения курса физики 10–11 классов позволяет продуктивно использовать «Иллюстрированный атлас по физике» для подготовки к экзаменам и зачетам, а также как учебное пособие для изучения физики как на базовом, так и на профильном уровне. Заголовки тем, изучаемых на профильном уровне, выделены красным цветом.

Особенно эффективно использование «Иллюстрированного атласа по физике» при подготовке к ЕГЭ.

§1. ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Движение — неотъемлемая форма существования вещества во Вселенной. В движении участвует каждый атом любого тела. Движение тела как целого относительно других тел называют *механическим движением*. Кинематика изучает механическое движение тел, не рассматривая причины, которыми это движение вызывается. Для описания механического движения тела необходимо знать его положение в пространстве в любой момент времени. Указать положение тела одной точкой при его движении возможно лишь в случае, когда размеры и форма тела несущественны, т.е. для материальной точки.

Материальная точка — обладающее массой тело, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

Положение материальной точки в пространстве в произвольный момент времени t можно задать либо с помощью координат $x(t)$, $y(t)$ ①, либо с помощью радиуса-вектора $\vec{r}$ ②, соединяющего начало отсчета с положением точки. Зависимости $x(t)$, $y(t)$ определяют закон движения тела в координатной форме, а $\vec{r}(t)$ — в векторной форме. Координатное и векторное описания движения тела эквивалентны ③. Закон движения в координатной форме можно получить, проецируя закон движения в векторной форме на координатные оси X и Y ($r_x = x$; $r_y = y$).

Изменение положения материальной точки в пространстве можно характеризовать либо изменением его координат Δx , Δy ④, либо изменением $\Delta \vec{r}$ радиуса-вектора ⑤, т.е. перемещением.

Перемещение — вектор, проведенный из начального положения материальной точки в конечное: $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.

Проекции вектора перемещения точки на оси X и Y совпадают с изменением ее координат ($\Delta r_x = \Delta x$; $\Delta r_y = \Delta y$ ⑥).

Расстояние, которое проходит тело, двигаясь из начального положения в конечное, определяет положительная скалярная величина — путь.

Путь — длина участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени ⑦.

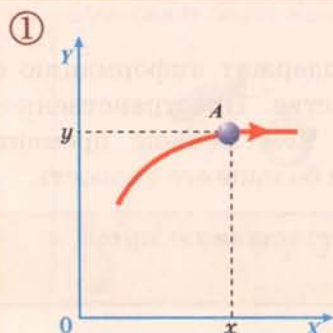
Например, за один оборот по окружности частица проходит путь $l = 2\pi R$. При этом ее перемещение $\Delta \vec{r} = 0$.

При криволинейном движении путь всегда больше модуля перемещения, так как длина дуги всегда больше длины стягивающей ее хорды.

При двух последовательных перемещениях результирующее перемещение равно их векторной сумме. В случае, если движение происходит по взаимно перпендикулярным направлениям, сложение перемещений можно выполнить по правилу треугольника. При движении автомобиля по пути ABC ⑧ перемещение из точки A в точку C $\vec{d} = \vec{a} + \vec{b}$. Путь ADC соответствует перемещению $\vec{d} = \vec{b} + \vec{a}$.

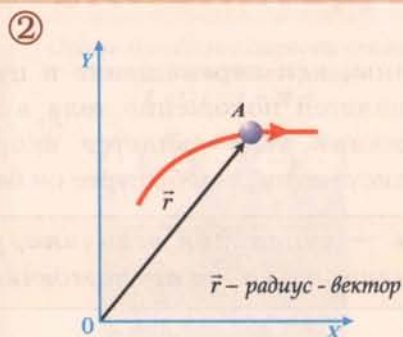
В евклидовом пространстве, например, на плоскости, результат сложения перемещений не зависит от последовательности, в которой происходят эти перемещения. В искривленном пространстве (например, на сфере) ⑨ результирующее перемещение зависит от последовательности перемещений. Перемещаясь сначала вдоль экватора на Восток, затем на Север на такое же расстояние ($BC = AB$), можно попасть в точку C . Если же из точки A продвинуться на Север в точку D , а потом на Восток ($DE = AD$), то можно оказаться в другой точке E .

КООРДИНАТНЫЙ СПОСОБ ЗАДАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ



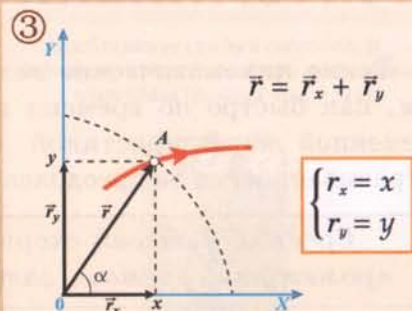
$\begin{cases} x(t) \\ y(t) \end{cases}$ — закон движения в координатной форме

ВЕКТОРНЫЙ СПОСОБ ЗАДАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ



$\vec{r}(t)$ — закон движения в векторной форме

СВЯЗЬ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ В КООРДИНАТНОЙ И ВЕКТОРНОЙ ФОРМАХ



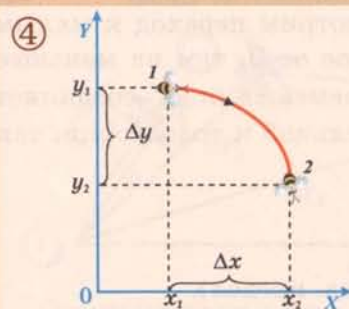
$\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y$

$\begin{cases} r_x = x \\ r_y = y \end{cases}$

$\vec{r}_x, \vec{r}_y$ — компоненты вектора $\vec{r}$ на оси X и Y (векторные величины)

r_x, r_y — проекции вектора $\vec{r}$ на оси X и Y (скалярные величины)

ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ

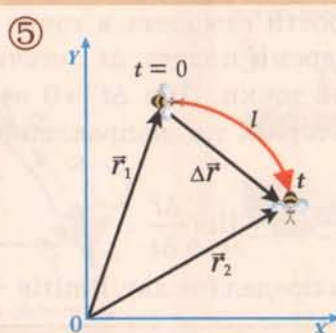


Изменение любой величины — разность ее конечного и начального значений

$$\Delta x = x_2 - x_1 > 0$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 < 0$$

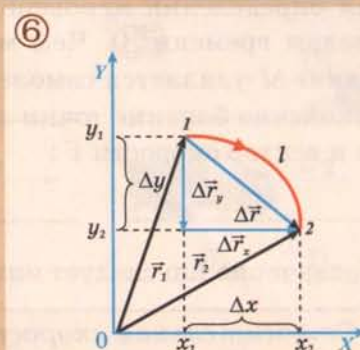
ИЗМЕНЕНИЕ РАДИУСА - ВЕКТОРА. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ



Перемещение $\Delta \vec{r}$ — вектор, проведенный из начального положения материальной точки в конечное

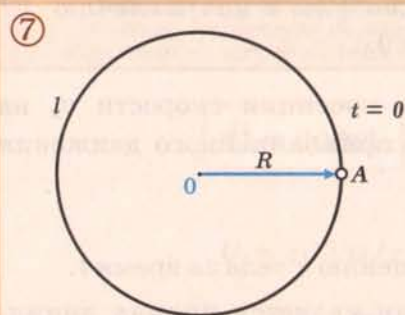
$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

ВЗАИМОСВЯЗЬ КООРДИНАТНОГО И ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ



$$\begin{cases} \Delta x = \Delta r_x \\ \Delta y = \Delta r_y \end{cases}$$

ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ



Путь l — длина участка траектории, пройденного за данный промежуток времени

за 1 оборот $l = 2\pi R$

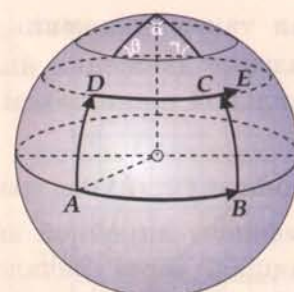
$$\Delta \vec{r} = 0$$

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГЕОМЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ



Результирующее перемещение не зависит от последовательности перемещений

НЕЕВКЛИДОВО ПРОСТРАНСТВО



Результирующее перемещение зависит от последовательности перемещений

§2. СКОРОСТЬ. РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Такие кинематические величины, как перемещение и путь, не содержат информацию о том, как быстро по времени изменяется положение тела в пространстве. Пространственно-временной характеристикой движения тела является скорость ①. Чем меньше времени затрачивает бегун на преодоление дистанции, тем быстрее он бежит, тем больше его скорость.

Средняя путевая скорость — скалярная величина, равная отношению пути к промежутку времени, затраченному на его прохождение:

$$v_{cp} = \frac{l}{t}.$$

Единица скорости — метр в секунду (м/с).

Чем меньше интервал времени, тем меньше за это время успевает измениться скорость, тем точнее ее можно определить.

Мгновенная скорость — средняя скорость за бесконечно малый интервал времени ②.

Для определения мгновенной скорости самолета в точке O рассмотрим переход к малым интервалам времени ③. Чем меньше время полета Δt , отсчитываемое от 0, тем на меньшее расстояние Δl удаляется самолет от этой точки. При $\Delta t \rightarrow 0$ вектор перемещения $\Delta \vec{r}$ соединяет две бесконечно близкие точки на траектории, т.е. направлен по касательной к траектории, так же как и вектор скорости $\vec{v}$:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Обозначение $\lim$ следует читать как предел (от лат. limitis — граница, предел).

Относительная скорость первого тела относительно второго равна разности скоростей тел:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2.$$

При движении тел в одном направлении (например, при обгоне) модуль относительной скорости равен разности скоростей ④. При встречном движении ⑤ тела сближаются с относительной скоростью, равной сумме их скоростей, поэтому встречное столкновение автомобилей, поездов столь опасно.

Если скорость движения тела остается постоянной по модулю и направлению ($\vec{v} = \text{const}$), возникает равномерное прямолинейное движение ⑥.

При таком движении ⑦ графиком зависимости от времени проекции скорости v_x на направление движения является константа. Закон равномерного прямолинейного движения материальной точки по оси X имеет вид:

$$x = v_x \cdot t.$$

Площадь ($v_x \cdot t$) под графиком зависимости $v_x(t)$ равна перемещению x тела за время t .

Графиком линейной зависимости координаты тела от времени является прямая линия, проходящая через начало координат. Для сравнения ⑧ приведены графики движения автомобиля, болида и сверхзвукового самолета, движущихся со скоростями 50, 100 и 350 м/с соответственно.

Чем круче график движения, тем больше скорость движения тела:

$$\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 \text{ при } v_{x_3} > v_{x_2} > v_{x_1}.$$

Скорость. Равномерное прямолинейное движение

СРЕДНЯЯ ПУТЕВАЯ СКОРОСТЬ



МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ — средняя скорость за бесконечно малый интервал времени



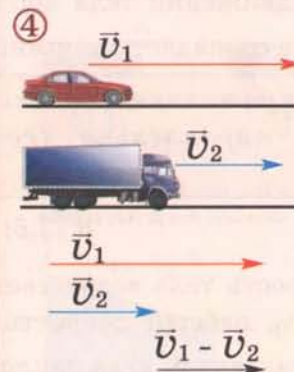
ВЕКТОР СКОРОСТИ



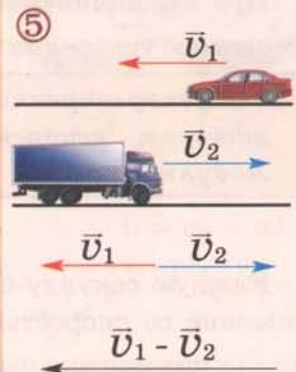
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$$

при движении в одном направлении



при встречном движении

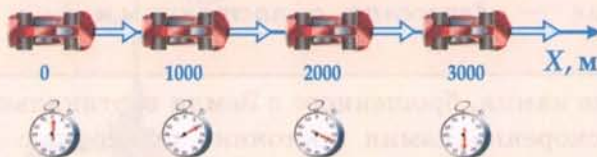


РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

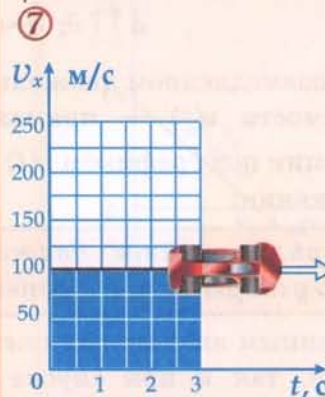
- ⑥ Равномерное прямолинейное движение – движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью

$$\vec{v} = \text{const}$$

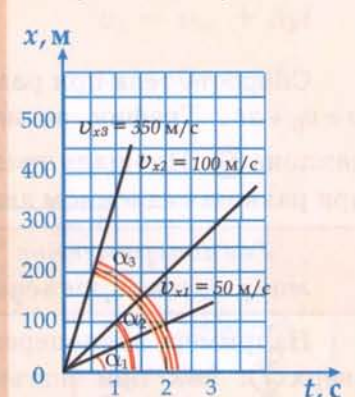
$$v_x = 100\text{ м/с}$$



Графический способ нахождения перемещения при равномерном прямолинейном движении тела



Графики движения тел, перемещающихся с различной скоростью



§3. УСКОРЕНИЕ

Физической величиной, характеризующей изменение скорости с течением времени, является **ускорение** ①. Чтобы определить изменение скорости $\Delta \vec{v}$ самолета за промежуток времени Δt , необходимо найти разность между его конечной скоростью $\vec{v} + \Delta \vec{v}$ (в момент времени $t + \Delta t$) и начальной $\vec{v}$ (в момент времени t).

Отношение $\Delta \vec{v} / \Delta t$ при неограниченном уменьшении промежутка времени Δt определяет вектор мгновенного ускорения:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение численно равно изменению скорости в единицу времени. Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с^2).

Вектор ускорения $\vec{a}$ параллелен вектору изменения скорости $\Delta \vec{v}$ (при $\Delta t \rightarrow 0$).

В общем случае вектор $\vec{a}$ может иметь составляющие, направленные как по касательной $\vec{a}_\tau$, так и по нормали (перпендикулярно) $\vec{a}_n$ к ней ②: $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$,

где $\vec{a}_\tau$ — касательное (тангенциальное) ускорение,

$\vec{a}_n$ — нормальное (центростремительное) ускорение.

При прямолинейном движении тела нормальное ускорение равно нулю ($\vec{a}_n = 0$), поэтому мгновенное ускорение тела совпадает с тангенциальным.

Равноускоренное прямолинейное движение — прямолинейное движение, при котором ускорение параллельно (сонаправлено) скорости и постоянно по модулю ③:

$$\vec{a} \uparrow \vec{v}; a = \text{const.}$$

Каждую секунду скорость тела возрастает на a м/с. Тогда через время t тело, начавшее движение со скоростью v_0 , наберет скорость $v = v_0 + at$. График зависимости $v(t)$ — прямая линия с положительным тангенсом угла наклона, начинающаяся на оси ординат из точки v_0 ④. Площадь трапеции под графиком $v(t)$ численно равна перемещению тела по оси X за время t при равноускоренном движении: $x - x_0 = \Delta x = v_0 t + \frac{at^2}{2}$.

Равнозамедленное прямолинейное движение — прямолинейное движение, при котором ускорение антипараллельно (противоположно направлено) скорости и постоянно по модулю ⑤:

$$\vec{a} \uparrow \vec{v}; a = \text{const.}$$

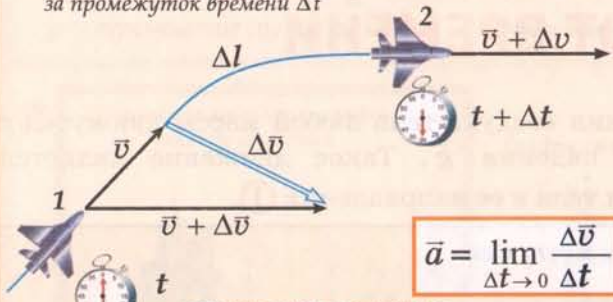
Скорость тела при равнозамедленном движении линейно уменьшается с течением времени: $v = v_0 + at$. График зависимости $v(t)$ — прямая линия с отрицательным тангенсом угла наклона ⑥. Площадь трапеции под графиком $v(t)$ равна перемещению тела по оси X за время t при равнозамедленном движении:

Равнопеременное прямолинейное движение — движение с постоянным по модулю и направлению ускорением: $a = \text{const.}$

Например, равнопеременным является движение камня, брошенного с Земли вертикально вверх ⑦: как при подъеме, так и при спуске ускорение камня постоянно по модулю и направлено вниз ⑧.

① ВЕКТОР МГНОВЕННОГО УСКОРЕНИЯ

Изменение скорости $\Delta \vec{v}$ при криволинейном движении за промежуток времени Δt

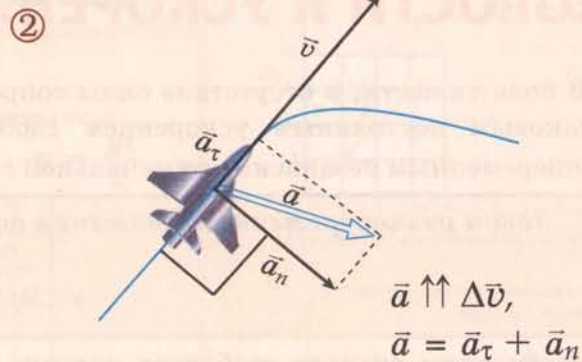


$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

МГНОВЕННОЕ УСКОРЕНИЕ – векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло

ТАНГЕНЦИАЛЬНОЕ И НОРМАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЯ

Направление вектора мгновенного ускорения при криволинейном движении



$$\vec{a} \uparrow \Delta \vec{v},$$

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$$

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

③ РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

$$\vec{a} \uparrow \vec{v},$$

$$a = \text{const}$$



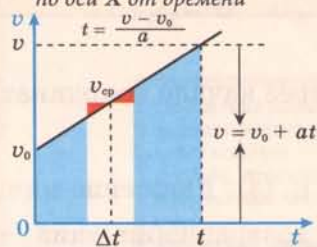
⑤ РАВНОЗАМЕДЛЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

$$\vec{a} \downarrow \vec{v},$$

$$a = \text{const}$$



④ Линейная зависимость скорости движения по оси X от времени



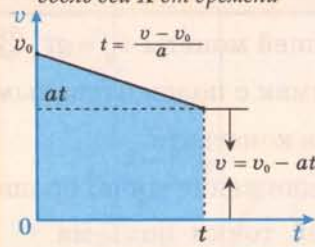
$$v = v_0 + at$$

$$\Delta x = \left(\frac{v + v_0}{2} \right) \left(\frac{v - v_0}{a} \right) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

⑥ Линейная зависимость скорости движения вдоль оси X от времени



$$v = v_0 - at$$

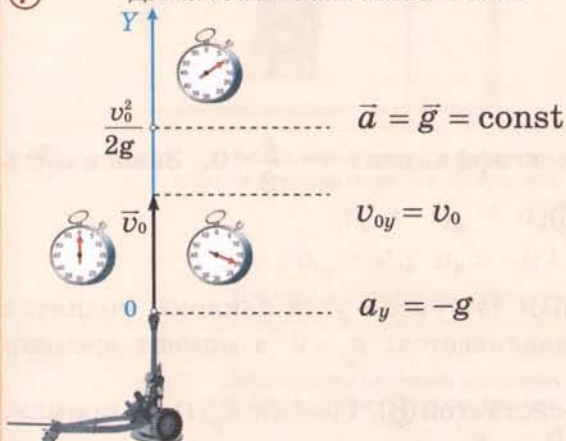
$$\Delta x = \left(\frac{v + v_0}{2} \right) \left(\frac{v_0 - v}{a} \right) = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}$$

ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ

$$x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}$$

РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

⑦ Движение тела в поле тяжести Земли



$$\vec{a} = \vec{g} = \text{const}$$

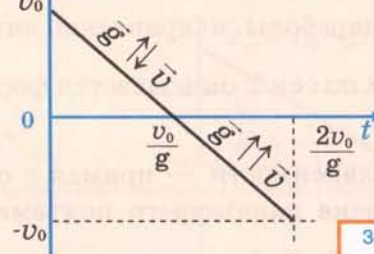
$$v_{0y} = v_0$$

$$a_y = -g$$

⑧ Зависимость проекции скорости v_y от времени

$$v_y = v_{0y} + a_y t$$

$$v_y = v_0 - gt$$



ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ

$$x = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$$

§4. РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ ПУТИ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ

В поле тяжести, в отсутствие силы сопротивления воздуха тела любой массы движутся с одинаковым постоянным ускорением свободного падения $\vec{g}$. Такое движение является равнопеременным независимо от начальной скорости тела и ее направления ①.

Закон равнопеременного движения по оси Y имеет вид:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2} \quad (1)$$

Рассмотрим сначала свободное падение монеты без начальной скорости с высоты H на землю ②. Направим ось Y вниз и выберем начало отсчета в верхней точке. Тогда $y_0 = 0$, $v_{0y} = 0$. Ускорение свободного падения $\vec{g}$ направлено вниз. Следовательно, его проекция на ось Y: $a_y = g$. Подстановка начальных условий (y_0, v_{0y}) и ускорения a_y в формулу (1) дает закон свободного падения тела без начальной скорости.

$$y = \frac{gt^2}{2}.$$

Координата y характеризует одновременно и перемещение, и путь монеты. Графиком такой квадратичной зависимости от времени является парабола с вершиной в начале координат.

При равноускоренном движении скорость тела линейно зависит от времени:

$$v_y = v_{0y} + a_y t \quad (2)$$

Для свободно падающей монеты $v_y = gt$ ③.

График $v_y(t)$ — прямая с положительным наклоном, проходящая через начало координат; $a_y = g$ — положительная константа.

Рассмотрим теперь движение мяча, брошенного вверх со скоростью v_0 ④. Движение мяча вверх вплоть до высшей точки подъема — равнозамедленное, а при возвращении вниз — равноускоренное. Однако в целом его движение является равнопеременным, так как все время движения ускорение мяча остается постоянным (равным g).

Направим ось Y вверх и выберем нуль отсчета в точке бросания. Тогда при $y_0 = 0$, $v_{0y} = v$, $a_y = -g$, закон движения (1) имеет вид:

$$y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Ветви такой параболы направлены вниз, так как коэффициент $-\frac{g}{2} < 0$. Зависимость проекции скорости по оси Y описывается формулой (2) ⑤:

$$v_y = v_0 - gt.$$

График этой зависимости — прямая с отрицательным тангенсом угла наклона, поднятая вверх на v_0 . В точке наивысшего подъема тело останавливается: $v_y = 0$ в момент времени

$t_{\max} = \frac{v_0}{g}$. Ускорение $a_y = -g$ является отрицательной константой ⑥. График $a_y(t)$ — прямая, параллельная оси времени.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

① $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}$
 y – перемещение (путь) тела
 $(y_0 = 0; v_{0y} = 0; a_y = g)$
 Ветви параболы $y(t)$ направлены вверх



③ Зависимость скорости свободного падения тела от времени

$v_y = v_{0y} + a_y t$



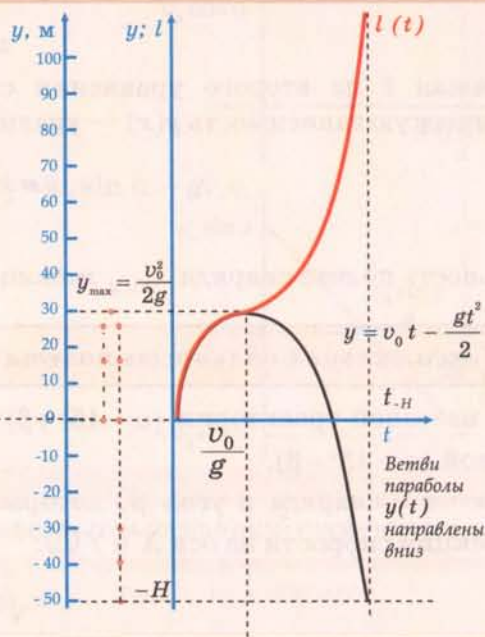
Прямая с положительным наклоном



РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

Зависимость перемещения y и пути l тела от времени

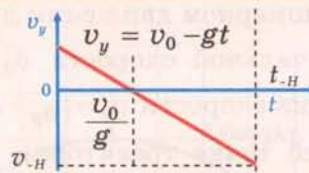
④ $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}$
 $(y_0 = 0; v_{0y} = v_0; a_y = -g)$



⑤ Зависимость проекции скорости тела на вертикальную ось от времени

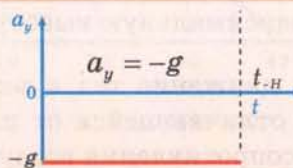
$v_y = v_{0y} + a_y t$
 $(v_{0y} = v_0; a_y = -g)$

Прямая с отрицательным наклоном



⑥ Зависимость проекции ускорения свободного падения тела от времени

$a_y < 0$



§5. БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Баллистика — раздел механики, изучающий движение тел в поле тяжести Земли. Для описания баллистического движения в качестве первого приближения удобно ввести идеализированную модель, рассматривая тело как материальную точку, движущуюся с постоянным ускорением свободного падения $\vec{g}$. При этом сопротивлением воздуха пренебрегают.

Рассмотрим основные параметры траектории снаряда, вылетающего с начальной скоростью v_0 из орудия, направленного под углом α к горизонту ①. Движение снаряда происходит в вертикальной плоскости XY , содержащей вектор v_0 . Выберем начало отсчета в точке вылета снаряда.

По оси Y движение является равнопеременным, так как ускорение свободного падения $\vec{g}$ направлено вертикально вниз и постоянно по модулю.

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}. \quad (1)$$

По оси X движение будет равномерным ($a_x = 0$).

$$x = x_0 + v_{0x}t. \quad (2)$$

Учитывая, что $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$, $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$, $a_y = -g$, уравнения (1), (2) можно представить в виде системы:

$$\begin{aligned} y &= (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2} \\ x &= (v_0 \cos \alpha)t \end{aligned} \quad (3)$$

Выражая t из второго уравнения системы (3) и подставляя его в первое, получаем параболическую зависимость $y(x)$ — уравнение траектории снаряда:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \quad (4)$$

Дальность полета снаряда $x_{\max}$ можно найти, полагая $y = 0$: $x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g}$ ②.

Максимальная дальность полета достигается при угле $\alpha = 45^\circ$ ($\sin 2\alpha = 1$).

При навесной траектории ($\alpha = 45^\circ + \beta$) дальность полета оказывается такой же, как и при настильной ($\alpha = 45^\circ - \beta$).

Скорость v снаряда и угол β , который образует вектор $\vec{v}$ с горизонталью, можно найти, зная проекции скорости на оси X и Y ③:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x}$$

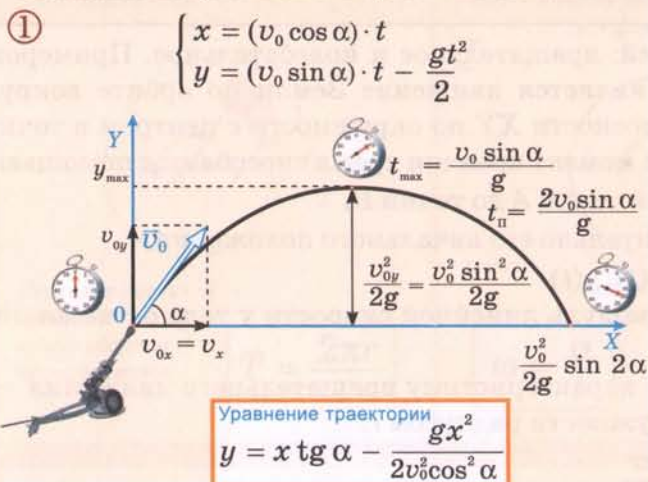
При равномерном движении по оси X проекция скорости v_x остается постоянной и равной проекции начальной скорости v_{0x} , т.е. $v_x = v_0 \cos \alpha$ ④. При равнопеременном движении по оси Y проекция скорости $v_y = v_{0y} + a_y t = v_0 \sin \alpha - gt$.

В верхней точке траектории вертикальная компонента скорости $v_y = 0$. Поэтому время подъема на максимальную высоту $t_{\max} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$.

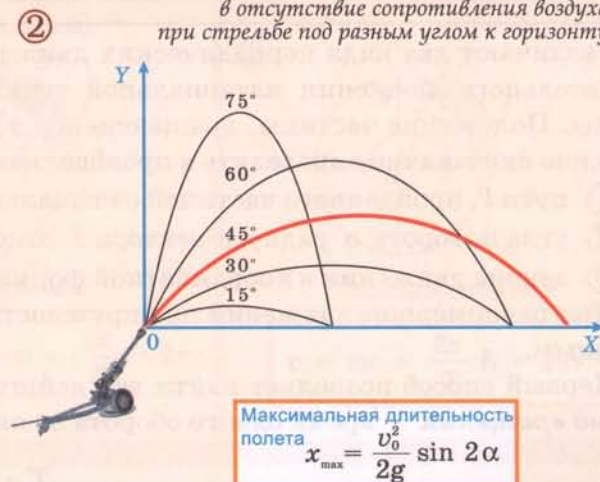
Реальное движение тел в земной атмосфере происходит по баллистической траектории, существенно отличающейся от параболической ⑤. Чем больше скорость движения тела, тем больше сила сопротивления воздуха и отличие баллистической траектории от параболы ⑥.

ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

Независимость вертикального и горизонтального движений

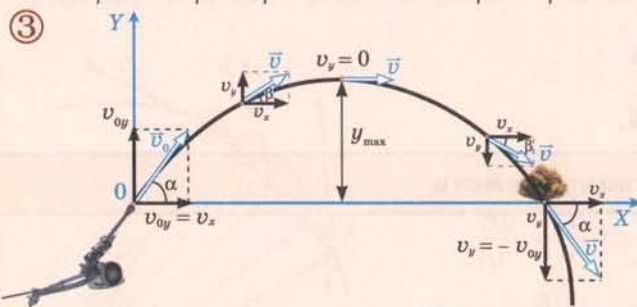


Баллистическая траектория снаряда в отсутствие сопротивления воздуха при стрельбе под разным углом к горизонту

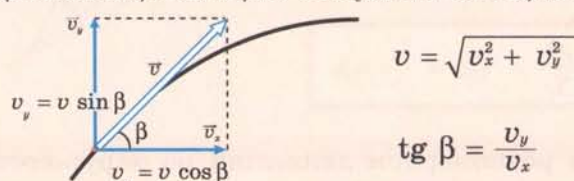


СКОРОСТЬ ПРИ БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ

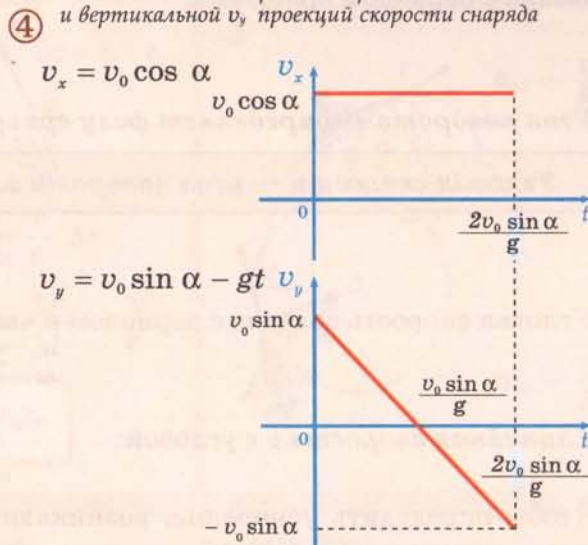
Скорость снаряда в различных точках траектории



Определение скорости снаряда и его угла наклона к горизонту

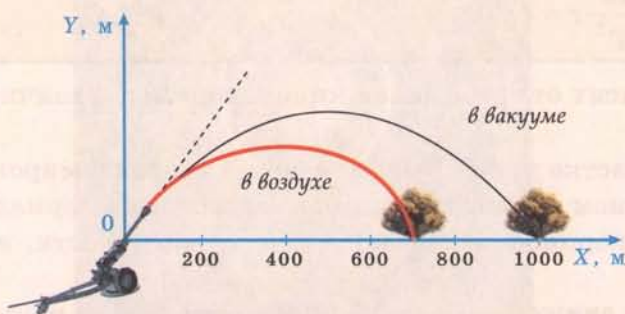


Зависимости от времени горизонтальной v_x и вертикальной v_y проекций скорости снаряда

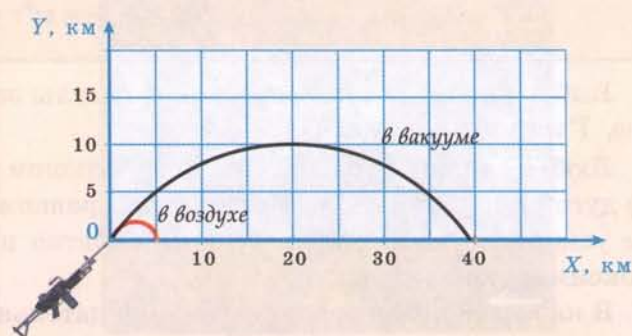


ОТЛИЧИЕ РЕАЛЬНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ОТ ПАРАБОЛЫ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ ВЫЛЕТА

⑤ Снаряд - $v_0 = 100 \text{ м/с}$



⑥ Пуля - $v_0 = 630 \text{ м/с}$



§6. КИНЕМАТИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Периодическое движение — движение, повторяющееся через равные промежутки времени.

Различают два вида периодических движений: вращательное и колебательное. Примером вращательного движения материальной точки является движение Земли по орбите вокруг Солнца. Положение частицы, вращающейся в плоскости XOY по окружности с центром в точке O , можно однозначно определить в произвольный момент времени тремя способами с помощью:

- ① пути l , пройденного частицей от начальной точки A до точки B ,
- ② угла поворота α радиуса-вектора $\vec{r}$ относительно его начального положения,
- ③ закона движения в координатной форме $x(t)$; $y(t)$.

При равномерном движении по окружности модуль линейной скорости v тела остается постоянным.

Первый способ позволяет найти важнейшую характеристику вращательного движения — **период вращения** — время одного оборота по окружности радиусом r :

$$T = \frac{2\pi r}{v}.$$

Частота вращения ν — число оборотов в единицу времени

— связана с периодом вращения:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Угол поворота α определяет фазу вращения.

Угловая скорость — угол поворота за единицу времени

$$\omega = \frac{\alpha}{t}.$$

Угловая скорость связана с периодом и частотой вращения:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu,$$

а **линейная скорость v** с угловой:

$$v = \omega r$$

Чтобы определить ускорение, возникающее при равномерном движении по окружности, найдем изменение скорости $\Delta \vec{v}$ частицы, т.е. разность ее конечной v_B и начальной v_A скоростей за промежуток времени Δt ④.

При $\Delta t \rightarrow 0$ вектор $\Delta \vec{v}$, как и вектор ускорения, перпендикулярен (нормален) скорости, т.е. направлен к центру окружности. Расчет нормального (центростремительного) ускорения дает:

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} r = 4\pi^2 \nu^2 r.$$

Выбор необходимой расчетной формулы зависит от того, какая кинематическая величина v , ω , T или ν известна.

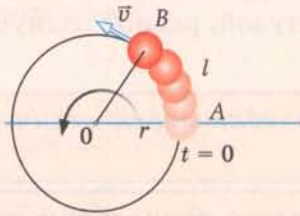
Любая сложная траектория на небольшом участке может быть заменена (аппроксимирована) дугой окружности ⑤. Поэтому при равномерном движении по такой траектории нормальное ускорение материальной точки обратно пропорционально радиусу дуги окружности, аппроксимирующей траекторию.

В качестве примеров показано вращательное движение Солнечной системы вокруг центра Галактики — Млечный Путь ⑥ и фазы вращения Луны вокруг Земли ⑦.

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

①

1. По пройденному ею пути l по окружности

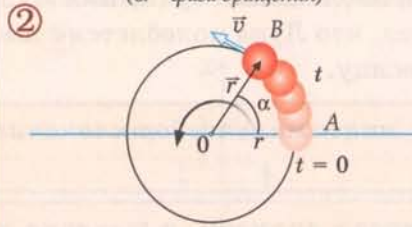


Период вращения T – время одного оборота по окружности

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

2. По углу поворота радиуса-вектора $\vec{r}$ относительно его начального положения (α – фаза вращения)

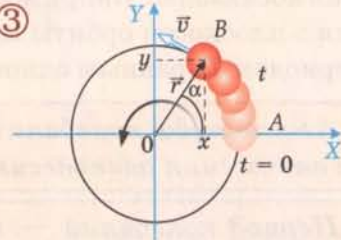


Угловая скорость ω

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

③

3. С помощью закона движения в координатной форме $x(t)$, $y(t)$



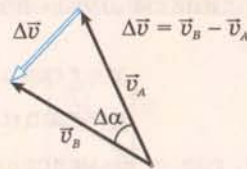
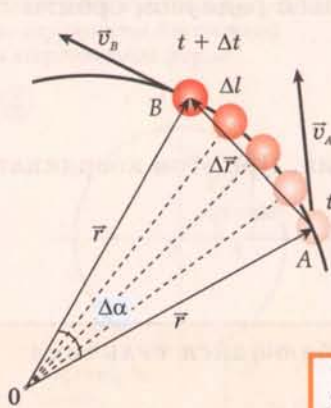
Линейная скорость v

$$v = \omega r = \frac{2\pi}{T} R = 2\pi\nu R$$

ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЕ (НОРМАЛЬНОЕ) УСКОРЕНИЕ

④ Ускорение при равномерном движении частицы по окружности

а) при $\Delta v \rightarrow 0$, $\Delta \alpha \rightarrow 0$; б) при $\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta \vec{v} \perp \vec{v}_A$, $\Delta \vec{v} \perp \vec{v}_B$



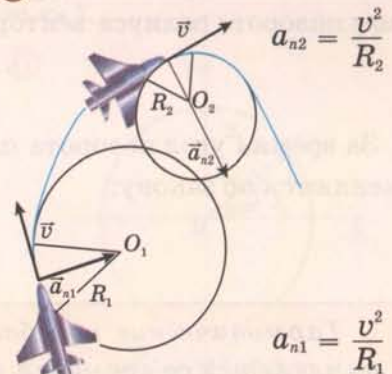
$$\frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{v}{r} \Rightarrow \Delta v = \frac{v}{r} \Delta r$$

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{r} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} R = 4\pi^2 \nu^2 r$$

Нормальное ускорение самолета при равномерном движении по криволинейной траектории

⑤

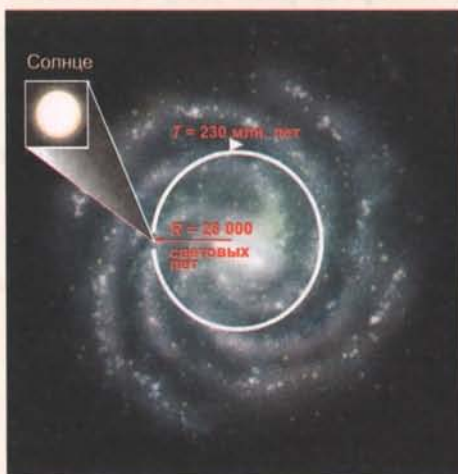


$$a_{n2} = \frac{v^2}{R_2}$$

$$a_{n1} = \frac{v^2}{R_1}$$

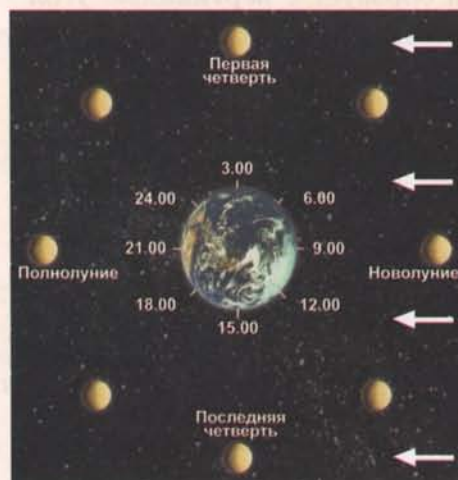
⑥

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ - МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ



⑦

ФАЗЫ ЛУНЫ
ВРАЩЕНИЕ ЛУНЫ ВОКРУГ ЗЕМЛИ



Глава 1. Кинематика материальной точки

§7. КИНЕМАТИКА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Колебательное движение — движение вдоль одного и того же отрезка с изменением направления движения (подобно колебаниям маятника). Вращательное и колебательное движения взаимосвязаны. Например, при наблюдении вращения Луны вокруг Земли с большого расстояния в плоскости орбиты кажется, что Луна колеблется с амплитудой, равной радиусу орбиты с периодом T , равным одному месяцу.

Амплитуда колебаний — максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия.

Период колебаний — интервал времени, в течение которого происходит одно полное колебание.

Сначала получим закон колебательного движения $x(t)$ Луны графически ①. Для этого отметим ее положение на орбите вокруг Земли в шестнадцать точках, разделенных по времени интервалами $T/16$, при наблюдении в плоскости орбиты и перпендикулярно к ней. Для построения графика $x(t)$ нанесем на оси t равномерную шкалу с ценой деления $T/16$, а по оси X соответствующие координаты в плоскости орбиты ②. Через период T Луна вновь проходит через первоначальное положение, а график закона колебаний продолжается по оси t с периодом T ③.

Закон колебательного движения $x(t)$ Луны можно получить из связи ее вращательного и колебательного движения ④. Координаты Луны по осям X и Y связаны с радиусом орбиты r и углом поворота радиуса-вектора $\vec{r}$:

$$x = r \cos \alpha,$$

$$y = r \sin \alpha.$$

За время t угол поворота $\alpha = \omega t$, где ω — угловая скорость вращения. При этом координаты изменяются по закону:

$$x = r \cos \omega t,$$

$$y = r \sin \omega t.$$

Гармонические колебания — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально).

Взаимосвязь вращательного и колебательного движения дает возможность найти **скорость и ускорение при колебательном движении**.

Линейная скорость при вращательном движении направлена перпендикулярно радиусу-вектору и образует с вертикалью угол ωt , равный углу поворота (как углу с соответственно перпендикулярными сторонами) ⑤. Ее проекция на ось X — скорость при гармонических колебаниях:

$$v_x = -v \sin \omega t = -\omega r \sin \omega t.$$

При равномерном вращении по окружности ускорение частицы направлено к центру окружности и равно ⑥

$$a_n = \omega^2 r.$$

Угол, который образует нормальное ускорение с вектором $\vec{a}_x$, равен ωt . Проекция вектора ускорения на ось X определяет ускорение при гармонических колебаниях по оси X :

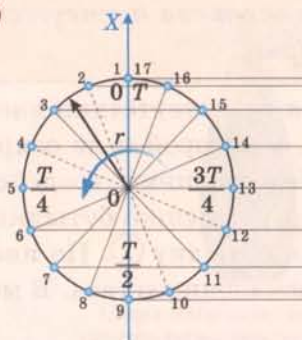
$$a_x = -a_n \cos \omega t = -\omega^2 r \cos \omega t.$$

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВРАЩАТЕЛЬНОГО И КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ

СВЯЗЬ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛУНЫ ВОКРУГ ЗЕМЛИ С ЕЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В ПЛОСКОСТИ ОРБИТЫ

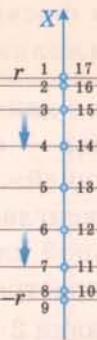
1. Положение Луны через равные промежутки времени $\Delta t = T/16$ при наблюдении перпендикулярно плоскости орбиты

①



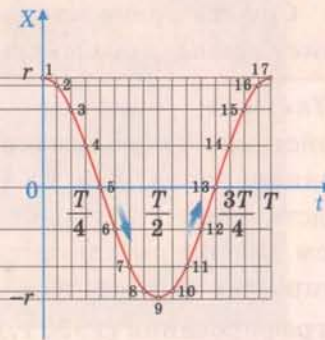
2. Положение Луны через равные промежутки времени $\Delta t = T/16$ при наблюдении в плоскости орбиты

②



3. График закона колебания Луны при наблюдении в плоскости орбиты

③

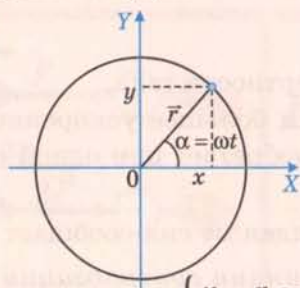


Гармонические колебания – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем синусоидально (или косинусоидально)

КООРДИНАТА, СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПРИ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Связь законов равномерного движения по окружности в векторной и координатной форме

④

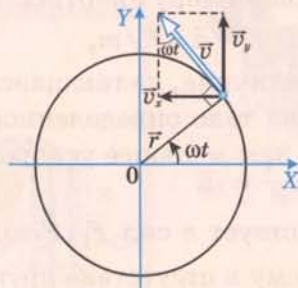


r – амплитуда колебаний

$$\begin{cases} x = r \cos \omega t \\ y = r \sin \omega t \end{cases}$$

Скорость колебательного движения по оси X

⑤

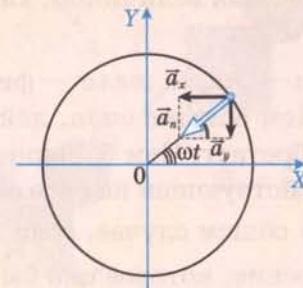


Скорость v_x

$$v_x = -v \sin \omega t = -\omega r \sin \omega t$$

Ускорение при колебательном движении по оси X

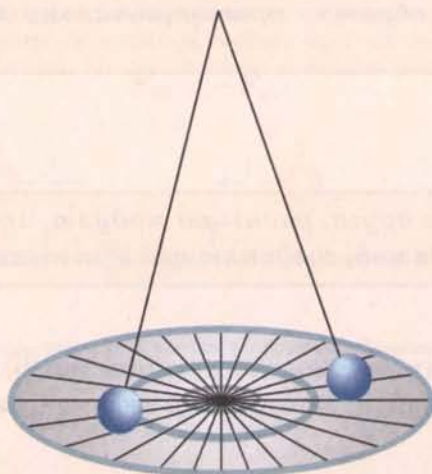
⑥



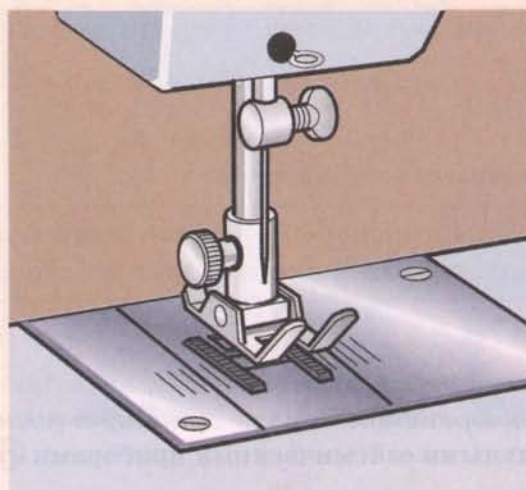
Ускорение a_x

$$a_x = -a_n \cos \omega t = -\omega^2 r \cos \omega t$$

КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ МАЯТНИКА ФУКО



КОЛЕБАНИЯ ИГЛЫ ШВЕЙНОЙ МАШИНЫ



§8. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

В XVII веке выдающийся английский ученый **Исаак Ньютон** сформулировал три закона, описывающих движение макроскопических тел со скоростями, много меньшими скорости света.

Первый закон Ньютона:

Существуют инерциальные системы отсчета, в которых все тела в отсутствие внешнего воздействия движутся прямолинейно и равномерно.

Инерция — явление сохранения состояния движения или покоя при отсутствии внешних воздействий. **Инерциальная система отсчета** — система отсчета, в которой тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения без внешних воздействий. Вследствие инерции монета, лежащая на плексигласе, закрывающем горлышко бутылки, при резком щелчке по плексигласу в горизонтальной плоскости падает в бутылку ①. По инерции расширяется от места взрыва в окружающее пространство облако раскаленного газа. В момент фотографирования (1990 г.) его диаметр составлял $2 \cdot 10^{13}$ км ②.

При наличии результирующего внешнего воздействия тело движется ускоренно или деформируется.

Сила — векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет форму и размеры.

Коэффициент пропорциональности между силой и ускорением для данного тела является постоянной величиной, характеризующей меру инертности тел ③:

$$\vec{a} = \vec{F} / m,$$

где m — **масса тела** — физическая величина, являющаяся мерой инертности тела.

Чем больше сила, действующая на тело определенной массы, тем большее ускорение оно приобретает. Чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно приобретает при одной и той же действующей на него силе.

В общем случае, если на тело действует n сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, то каждая из сил сообщает телу ускорение, которое она бы сообщила ему в отсутствие других сил. **Принцип суперпозиции (наложения) сил** ④: Результирующая (равнодействующая) сила, действующая на тело со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми каждое из этих тел действует на данное тело.

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

Второй закон Ньютона:

В инерциальной системе отсчета ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \sum \vec{F} / m.$$

Третий закон Ньютона:

Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти тела:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Третий закон Ньютона справедлив при любых массах взаимодействующих тел ⑤. Ускорение, приобретаемое Землей при старте космического корабля, может быть зафиксировано чувствительными сейсмическими приборами ⑥.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее (его) изменить это состояние

①



Сохранение состояния покоя: монета проваливается в бутылку

Расширение облака раскаленного газа, образовавшегося при взрыве сверхновой звезды (1987А), в космическом пространстве

②

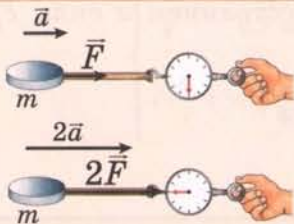


ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

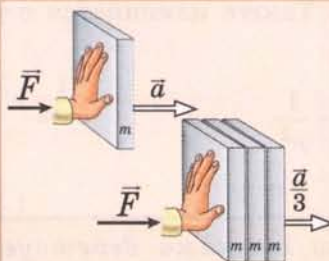
В инерциальной системе отсчета ускорение тела прямо пропорционально векторной сумме всех действующих на тело сил и обратно пропорционально массе тела

③

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$$



Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на тело

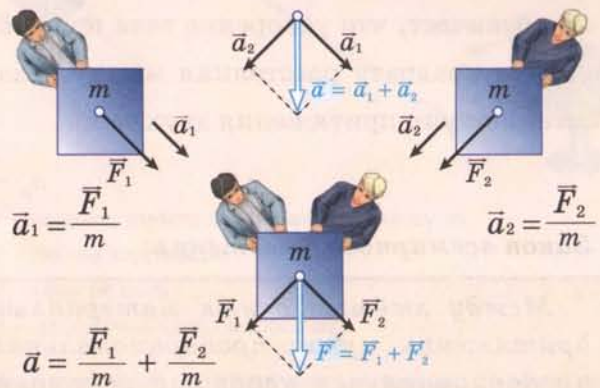


Ускорение тела обратно пропорционально его массе

④

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ТЕЛ

Результирующая (равнодействующая) сила, действующая на частицу со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми каждое из этих тел действует на частицу

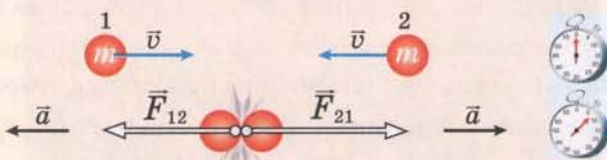


ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти тела

⑤

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



Равенство сил действия и противодействия при столкновении двух одинаковых шаров

$$\vec{F}_{12} = m\vec{a}_1; \vec{F}_{21} = m\vec{a}_2 \quad (\vec{a}_1 = -\vec{a}_2)$$

⑥

Старт ракеты "Протон"



§9. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

В 1685 г. **Исаак Ньютон** предположил, что движение земных объектов и небесных тел подчиняется общим закономерностям: все тела притягиваются друг к другу гравитационными силами. Единый универсальный закон тяготения справедлив для всей Вселенной: свободное падение яблока на Землю и движение Луны имеют общую причину — гравитационное притяжение к Земле.

Радиус действия гравитационного притяжения неограничен. Выясним зависимость силы притяжения от расстояния между телами ①. Для этого достаточно знать зависимость ускорения от расстояния между телами, так как $F_g = ma$.

Луна, вращаясь вокруг Земли с периодом $T = 27,2$ сут $= 2,36 \cdot 10^6$ с, находится на расстоянии $r = 384000$ км от Земли, в 60 раз большем радиуса Земли $R_{\oplus} = 6400$ км:

$$\frac{R_{\oplus}}{r} = \frac{1}{60}.$$

Нормальное (центростремительное) ускорение Луны, приобретаемое под действием гравитационного притяжения Земли, $a_n = 4\pi^2 r / T^2 = 0,0027$ м/с², можно сравнить с ускорением свободного падения $g = 9,8$ м/с² на Землю.

$$\frac{a_n}{g} = \frac{0,0027}{9,8} = \frac{1}{3600} = \frac{1}{60^2} = \left(\frac{R_{\oplus}}{r}\right)^2.$$

Это означает, что ускорение тела под действием гравитационной силы F_g обратно пропорционально квадрату расстояния между телами. Также изменяется с расстоянием и сила F_g гравитационного притяжения двух тел:

$$a_n \sim F_g \sim \frac{1}{r^2}.$$

Закон всемирного тяготения:

Между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек, обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними, направленная вдоль прямой, соединяющей эти точки:

$$F_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

где G — **гравитационная постоянная** (коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел) ②.

В 1798 г. гравитационная постоянная была измерена английским физиком **Генри Кавендишем** с помощью крутильных весов ③.

Два шарика 1, имеющих одинаковую массу m_1 , укреплены на концах легкого коромысла 2, подвешенного на упругой нити 3. Шарiki находятся на расстоянии r от более массивных шаров 4 массой m_2 . Под действием сил притяжения малых шаров к большим коромысло поворачивается. По углу закручивания нити определяется сила гравитационного притяжения F_{12} шариков массами m_1 и m_2 . Кавендиш нашел числовое значение гравитационной постоянной:

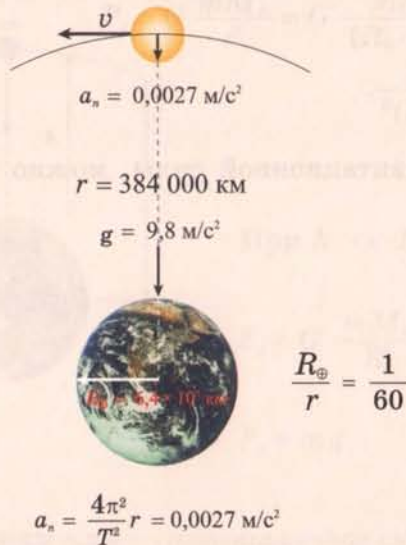
$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух тел, массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПРИТЯЖЕНИЕ

①

Совпадение нормального ускорения Луны, вращающейся вокруг Земли, с ускорением, приобретаемым Луной под действием силы притяжения к Земле



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a_n}{g} = \frac{0,0027 \text{ м/с}^2}{9,8 \text{ м/с}^2} = \frac{1}{3600} \\ \left(\frac{R_{\oplus}}{r} \right)^2 = \left(\frac{1}{60} \right)^2 = \frac{1}{3600} \end{array} \right.$$

$$a_n \sim F_g \sim \frac{1}{r^2}$$

Сила гравитационного притяжения двух тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

②

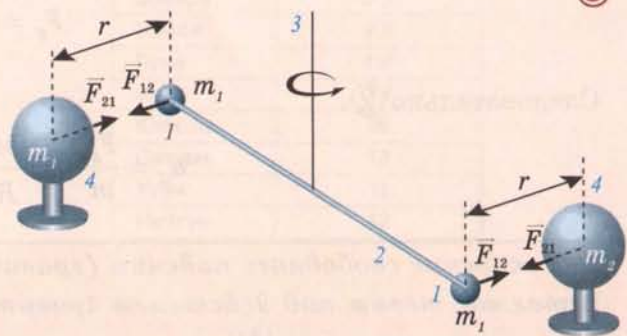
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где G – гравитационная постоянная (коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел)

Принципиальная схема опыта Кавендиша по определению гравитационной постоянной

Крутильные весы

③



1 – шарики, имеющие одинаковую массу m_1

2 – легкое коромысло

3 – упругая нить

4 – массивные шары массой m_2

Под действием сил притяжения малых шаров к большим коромысло поворачивается. По углу закручивания нити определяется сила гравитационного притяжения F_{12} шариков массами m_1 и m_2

ЮПИТЕР СО СПУТНИКАМИ



$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н м}^2 / \text{кг}^2$$

Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух тел, массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого

§10. СИЛА ТЯЖЕСТИ

Все тела притягиваются друг к другу гравитационными силами.

Сила тяжести — гравитационная сила, действующая на тело ①.

Например, на тело массой m , находящееся на высоте h над поверхностью Земли, действует гравитационная сила притяжения Земли:

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{r^2} = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}.$$

Ускорение, приобретаемое телом под действием гравитационной силы, можно найти из второго закона Ньютона:

$$a_g = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}.$$

Вблизи поверхности Земли ($h \ll R_{\oplus}$)

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}.$$

Следовательно ②,

$$a_g = \frac{F_g}{m} = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Ускорение свободного падения (гравитационное ускорение) — ускорение, приобретаемое телом под действием гравитационной силы вблизи поверхности небесных тел (планет, звезд).

Гравитационное ускорение у поверхности планет Солнечной системы зависит от массы и радиуса планеты ③.

В отсутствие сопротивления воздуха все тела вблизи поверхности Земли падают с одинаковым ускорением g . Английский ученый **Роберт Бойль** наблюдал синхронное падение различных предметов в сосуде, из которого был откачан воздух ④. В вакууме яблоко и перо падают синхронно. Синхронное падение птичьего пера и молотка на поверхность Луны наблюдали американские астронавты **Д. Скотт** и **Дж. Ирвин**.

В воздухе падение тел происходит иначе, чем в вакууме. На тело, движущееся в воздухе, действует сила сопротивления воздуха. Свободно падающее тело вначале движется, как в вакууме, с ускорением свободного падения, так как сила сопротивления воздуха пренебрежимо мала при небольшой скорости. Увеличение скорости падения тела приводит к увеличению силы сопротивления воздуха и соответственно к уменьшению ускорения тела. Когда сила сопротивления воздуха становится равной силе притяжения тела к Земле, ускорение тела оказывается равным нулю. Вблизи Земли тела, падающие с большой высоты, имеют постоянную скорость ⑤.

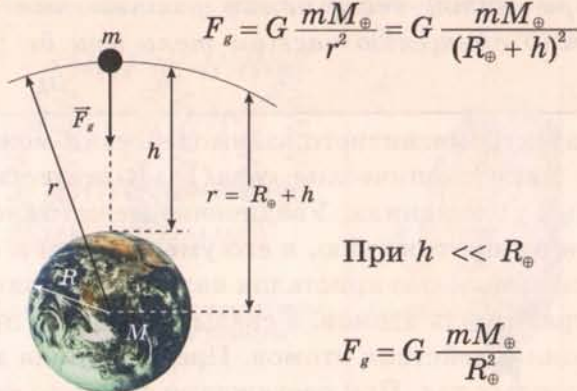
Легкие тела с большой площадью поверхности (снежинки, листья) через короткий промежуток времени начинают двигаться в воздухе равномерно с небольшой скоростью.

Скорость тяжелых предметов при падении в атмосфере Земли возрастает в течение нескольких первых секунд, а затем остается постоянной (порядка 100 м/с).

СИЛА ТЯЖЕСТИ

Гравитационная сила в поле тяжести Земли

①



При $h \ll R$

$$F_g = G \frac{mM}{R^2}$$

$$F_g = mg$$

Сила тяжести – гравитационная сила, действующая на тело

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

При $h \ll R$

② $a_g = g = \frac{F_g}{m} = G \frac{M}{R^2} = 9,8 \text{ м/с}^2$

Ускорение свободного падения (гравитационное ускорение) – ускорение, приобретаемое телом под воздействием гравитационной силы вблизи поверхности небесных тел (планет, звезд)

ГРАВИТАЦИОННОЕ УСКОРЕНИЕ НА ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

③

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

ПАДЕНИЕ ТЕЛ В ОТСУТСТВИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

④



Синхронное свободное падение яблока и пера в вакууме

ПАДЕНИЕ ТЕЛ В ВОЗДУХЕ

Скорость падения тел с большой высоты на Землю

⑤

Падающее тело	Скорость падения различных тел с большой высоты на Землю, м/с
Перо птицы	0,4
Лист бумаги	0,5
Снежинка	1
Парашютист (раскрытый парашют)	7
Монета	9
Мышь	13
Парашютист (нераскрытый парашют)	60
Пуля (крупного калибра)	100
Большой камень	200

§11. СИЛА УПРУГОСТИ, ВЕС ТЕЛА

Внешнее механическое воздействие на тело может приводить к изменению его формы и размеров. Восстановление первоначальных размеров и формы тела происходит в результате действия силы упругости.

Сила упругости — сила, возникающая при малой деформации растяжения (сжатия) тела, направленная противоположно смещению частиц тела при деформации.

Возникновение этой силы обусловлено силами электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами, из которых состоят все макроскопические тела ①. В отсутствие внешнего воздействия атомы находятся в равновесных положениях. Увеличение межатомного расстояния по сравнению с равновесным приводит к их притяжению, а его уменьшение к отталкиванию атомов. Поэтому простейшей механической моделью кристалла являются шарики, соединенные пружинами. В этой модели шарики играют роль атомов, а связывающие их пружины имитируют особенности электромагнитного взаимодействия атомов. Предложенная модель позволяет просто объяснить упругие свойства твердых тел. При растяжении твердого тела увеличивается среднее расстояние между атомами (пружины растягиваются). Поэтому суммарная сила притяжения атомов (сила упругости пружин) стремится сжать тело до первоначальных размеров. В случае сжатия тела уменьшение межатомных расстояний (сжатие пружин) приводит к возникновению силы отталкивания атомов (растягивающей упругой силы), восстанавливающей первоначальную длину тела.

Если воздушный шарик прижимается к стене с силой $\vec{F}$, то на руку действует *сила нормальной реакции опоры* $\vec{N}_1$ — сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно ее поверхности ②. О величине силы упругости можно судить по степени растяжения или сжатия пружины.

Закон Гука:

Модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$, возникающей при деформации пружины (тела), пропорционален ее удлинению $\Delta l = |l - l_0|$,

где l — длина пружины, l_0 — длина нерастянутой пружины ③:

$$F_{\text{упр}} = k \Delta l.$$

Закон Гука справедлив при малом удлинении $\Delta l \ll l_0$.

На тело массой m , подвешенное на пружине, действует сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения $\vec{T}$ ④. *Сила натяжения* — сила упругости, действующая на тело со стороны нити или пружины. В равновесии $T = mg$. По третьему закону Ньютона на пружину со стороны тела действует в направлении силы тяжести сила упругости, или вес, равный по модулю и противоположно направленный силе натяжения: $\vec{P} = -\vec{T}$. При подвешивании тела на подвес (пружину) будет действовать упругая сила, направленная вниз.

Вес тела — суммарная сила упругости тела, действующая при наличии силы тяжести на все опоры, подвесы.

Вес тела на опоре ⑤ определяется приростом суммарной силы отталкивания между атомами, возникающим из-за сжатия тел силой тяжести. Сила тяжести приложена к телу, а вес к опоре, подвесу.

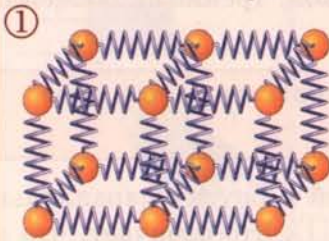
СИЛА УПРУГОСТИ – сила, возникающая при деформации тела и направленная противоположно направлению смещения частиц при деформации

ВЕС ТЕЛА – суммарная сила упругости тела, действующая при наличии силы тяжести на все опоры, подвесы

УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТЕЛ

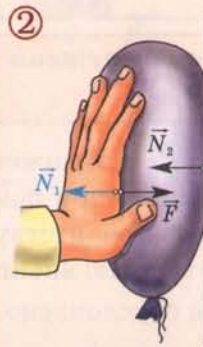
ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИЛЫ УПРУГОСТИ ПРИ ПОДВЕШИВАНИИ ТЕЛА

Механическая модель кристалла



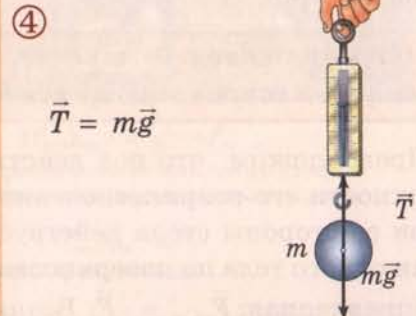
Сила упругости восстанавливает первоначальные размеры и форму тела

Сжатие воздушного шарика под действием силы $\vec{F}$ и силы реакции $\vec{N}_2$ стены

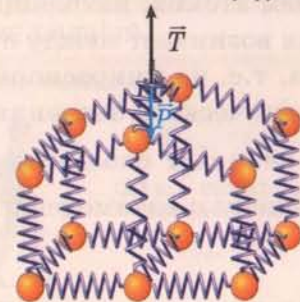


Сила реакции опоры – сила упругости, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно ее поверхности

Измерение веса тела



Модель возникновения силы упругости



$$\vec{P} = -\vec{T}$$

ЗАКОН ГУКА

Модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$, возникающей при деформации тела, пропорционален его удлинению Δl

$$\textcircled{3} \quad F_{\text{упр}} = k\Delta l,$$

где k – жесткость пружины,

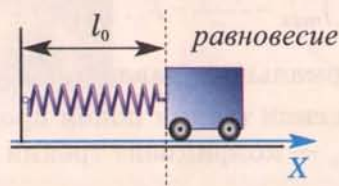
$$\Delta l = |l - l_0| = |\Delta x|,$$

$$\Delta l \ll l_0$$

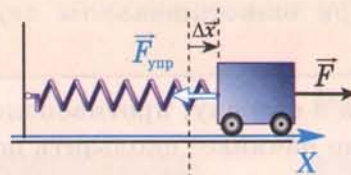
Упругие силы растяжения и сжатия в пружине под действием внешней силы

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИЛЫ УПРУГОСТИ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ТЕЛА НА ОПОРЕ

а) нерастянутая пружина

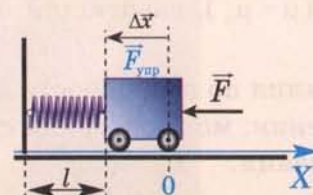


б) растянутая пружина

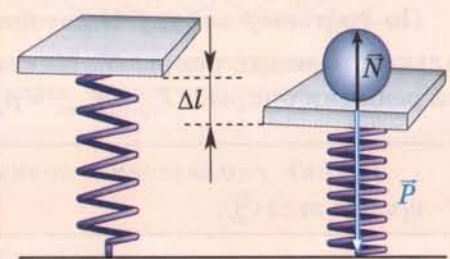


$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\Delta\vec{x}$$

в) сжатая пружина

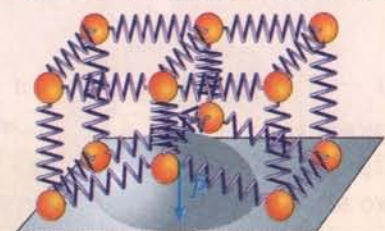


Измерение веса тела



$$\vec{P} = -\vec{N}$$

Модель возникновения силы упругости



$$\vec{P} = m\vec{g}$$

§12. СИЛА ТРЕНИЯ

Сила трения — сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкосновения.

При контакте твердых тел возможны три вида трения: трение покоя, трение скольжения, трение качения.

Трение покоя — трение, возникающее при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

Предположим, что под действием внешней силы $\vec{F}$, приложенной к бруску параллельно поверхности его соприкосновения со столом, брусок остается в покое ①. Это означает, что на брусок со стороны стола действует **сила трения покоя**, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого, равная по модулю внешней силе, но противоположно направленная: $\vec{F}_{\text{тр.п.}} = -\vec{F}$. Возникновение этой силы обусловлено электромагнитным взаимодействием атомов, находящихся на поверхности соприкосновения тел. Наибольшая сила притяжения возникает между атомами веществ, находящимися на минимальном расстоянии друг от друга, т.е. на микроскопических выступах. Когда приложенная сила достигает максимального критического значения $(F_{\text{тр.п.}})_{\text{max}}$, достаточного для разрыва связей между выступами, брусок начинает скользить по столу. Естественно предположить, что $(F_{\text{тр.п.}})_{\text{max}}$ пропорциональна числу n взаимодействующих выступов и давлению p бруска на стол:

$$(F_{\text{тр.п.}})_{\text{max}} \sim np.$$

Давление равно отношению силы нормального давления $F_{\perp}$, действующей перпендикулярно поверхности соприкосновения тел, к площади поверхности S : $p = F_{\perp} / S$. Число взаимодействующих выступов пропорционально площади поверхности соприкосновения тел: $n \sim S$. Поэтому **максимальная сила трения покоя** не зависит от площади соприкосновения поверхностей ②:

$$(F_{\text{тр.п.}})_{\text{max}} \sim \frac{SF_{\perp}}{S} \sim F_{\perp}.$$

По третьему закону Ньютона сила нормального давления $F_{\perp}$ равна по модулю силе нормальной реакции опоры N . Максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормальной реакции опоры: $(F_{\text{тр.п.}})_{\text{max}} = \mu_n N$, где μ_n — коэффициент трения покоя.

Трение скольжения возникает при относительном перемещении соприкасающихся тел ③.

Сила трения скольжения направлена в сторону, противоположную относительной скорости соприкасающихся тел. Когда одно тело начинает скользить по поверхности другого, связи между атомами первоначально неподвижных тел разрываются — трение уменьшается. Сила трения скольжения

$$F_{\text{тр.}} = \mu N,$$

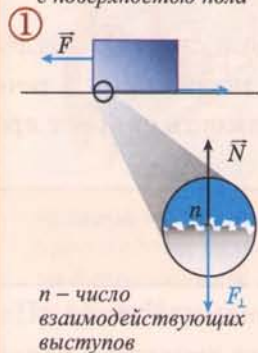
где μ — коэффициент трения скольжения ($\mu < \mu_n$), зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

При качении колеса ④ без проскальзывания по поверхности **сила трения качения** значительно меньше силы трения при его скольжении: молекулярные связи разрываются при подъеме участков колеса быстрее, чем при скольжении.

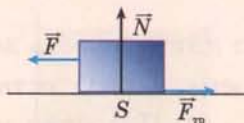
СИЛА ТРЕНИЯ – сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующих их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкосновения

ТРЕНИЕ ПОКОЯ

Взаимодействие бруска с поверхностью пола



Силы взаимодействия



$$(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} \sim np,$$

$$\text{где } p = \frac{F_{\perp}}{S}, n \sim S$$

② Равенство сил, требующихся для сдвига книги (независимо от ее положения)



$$(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} = S \frac{F_{\perp}}{S} = F_{\perp}$$

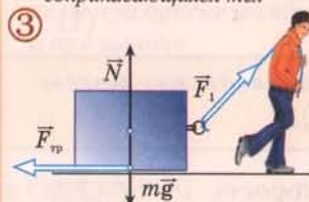
Максимальная сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения поверхностей, а пропорциональна силе нормального давления

$$(F_{\text{тр. п}})_{\text{max}} = \mu_{\text{п}} N,$$

где $\mu_{\text{п}}$ – коэффициент трения покоя

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Относительное перемещение соприкасающихся тел



$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения скольжения ($\mu < \mu_{\text{п}}$), зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей

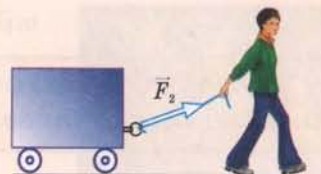
Скольжение фигуристов



ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

Сравнение сил трения качения и скольжения

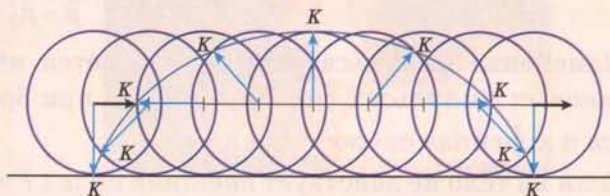
④



$$F_{\text{тр. кач}} = \mu_{\text{кач}} N,$$

где $\mu_{\text{п}}$ – коэффициент трения качения ($\mu_{\text{кач}} \ll \mu$)

Траектория точки на ободе колеса при его качении



Молекулярные связи разрываются при подъеме участков колеса быстрее, чем при скольжении

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТРЕНИЯ

Использование смазки



Корабль на воздушной подушке



§13. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Законы динамики Ньютона описывают движение механической системы в результате взаимодействия ее элементов и действия внешних сил. В случае одномерного движения материальной точки вдоль оси X действующая на нее сила $\vec{F}(x, t)$ может зависеть как от координаты точки x , так и от времени.

Рассмотрим сначала, как на движение тела влияет длительность действия силы ①. Будем считать, что сила $\vec{F}$, начиная действовать в момент времени $t = 0$, остается постоянной в течение времени Δt и затем становится равной нулю при $t > \Delta t$. Подобная зависимость силы от времени реализуется, например, при броске шайбы хоккеистом.

Временной характеристикой действия силы является импульс силы — произведение силы и длительности ее действия $F\Delta t$.

Импульс силы $F\Delta t$ численно равен площади прямоугольника со сторонами F и Δt . Под действием постоянной силы $\vec{F}$ шайба массой m , покоящаяся при $t < 0$, будет двигаться равноускоренно с ускорением $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$. Скорость $\vec{v}$, приобретаемая ей за промежуток времени Δt ,
$$\vec{v} = \vec{a}\Delta t = \frac{\vec{F}\Delta t}{m}.$$

Тогда
$$m\vec{v} = \vec{F}\Delta t. \quad (1)$$

Импульс тела — векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость и имеющая направление скорости: $\vec{p} = m\vec{v}$ ②.

Если начальная скорость шайбы равна $\vec{v}_0$, а импульс $\vec{p}_0$, то ее скорость $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{F}\Delta t/m$, а изменение импульса

$$\vec{p} - \vec{p}_0 = \vec{F}\Delta t. \quad (2)$$

Изменение импульса тела определяется импульсом силы, действующей на него ③. При одинаковых импульсах сил $F_1\Delta t_1 = F_2\Delta t_2$ при броске и щелчке будут одинаковы изменения импульса и конечная скорость шайбы.

Если на тело не действует внешняя сила ($\vec{F} = 0$), импульс тела сохраняется: $\vec{p} = \vec{p}_0$.

Реактивное движение — движение, возникающее при отделении от тела с некоторой скоростью какой-либо его части. Важным примером реактивного движения является движение ракеты ④. Отделяющейся частью тела (ракеты) при таком движении является струя горячих газов, образующихся при сгорании топлива. При выхлопе с большой скоростью из ракеты реактивной струи топлива ракета вследствие отдачи устремляется в противоположную сторону.

Замкнутая система тел система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю ⑤.

Такую систему образуют, например, два шара массой m_1 и m_2 , движущиеся навстречу друг другу с начальной скоростью $\vec{v}_{10}$ и $\vec{v}_{20}$, если пренебречь внешними силами, действующими на шары (например, силой тяжести).

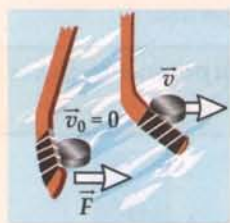
Закон сохранения импульса:

Суммарный импульс замкнутой системы тел остается постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_{10} + m_2\vec{v}_{20}. \quad (3)$$

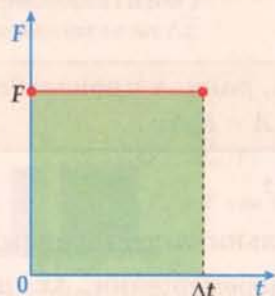
ИМПУЛЬС СИЛЫ – временная характеристика действия силы

① Зависимость силы, действующей на шайбу при броске, от времени



Импульс силы – произведение силы на длительность ее действия:

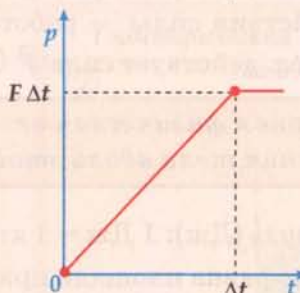
$$\vec{F} \Delta t$$



Импульс силы $F \Delta t$ численно равен площади прямоугольника со сторонами F и Δt

② ИМПУЛЬС ТЕЛА

Зависимость импульса шайбы от времени



$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$\vec{v} = \vec{a} \Delta t = \frac{\vec{F}}{m} \Delta t$$

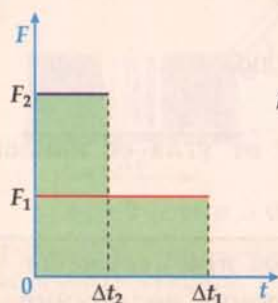
$$\vec{p} = m \vec{v} = \vec{F} \Delta t$$

Импульс тела – векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость и имеющая направление скорости:

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

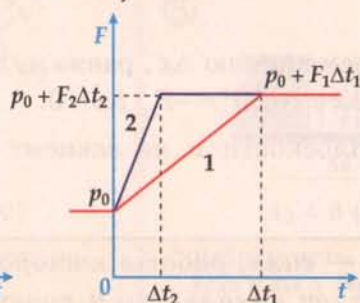
③ ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТЕЛА

Равенство импульсов силы при броске шайбы и при щелчке



$$F_1 \Delta t_1 = F_2 \Delta t_2$$

Зависимость импульса шайбы при броске (1) и при щелчке (2) от времени



$$\vec{p} - \vec{p}_0 = \vec{F} \Delta t$$

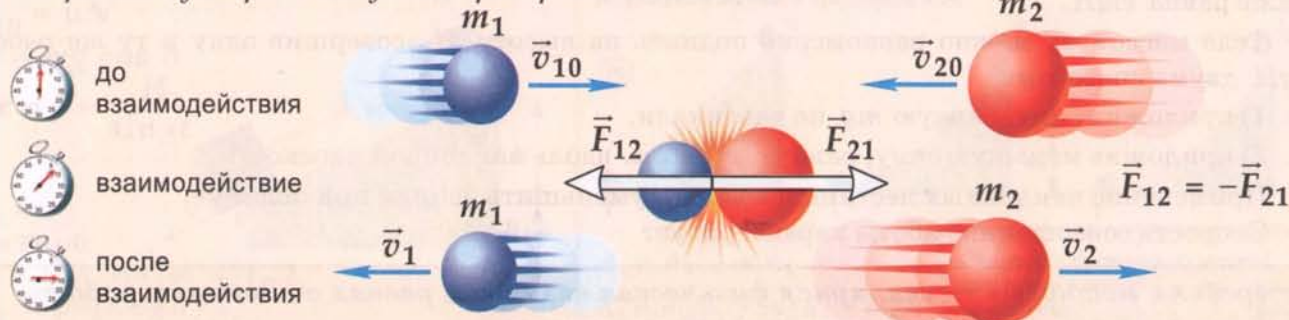
④ РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Старт ракеты "Союз-ТМА"



⑤ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Сохранение суммарного импульса шаров при их столкновении



Замкнутая система – система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_{10} + m_2 \vec{v}_{20}$$

Суммарный импульс замкнутой системы тел остается постоянным при любых взаимодействиях тел системы между собой

§14. РАБОТА СИЛЫ

По аналогии с временной характеристикой силы (импульсом силы) введем пространственную характеристику действия силы — работу. Предположим, что на тело, движущееся вдоль оси X , на перемещении Δx действует сила $\vec{F}$ ①.

Работа — скалярная физическая величина, равная произведению проекции силы на ось X и перемещения тела вдоль этой оси: $A = F_x \Delta x$.

Единица работы *джоуль* (Дж): $1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$.

Работа силы численно равна площади прямоугольника со сторонами F_x и Δx ②.

Проекция силы F_x на направление вектора перемещения $\Delta \vec{x}$ равна проекции вектора силы $\vec{F}$ на ось X : $F_x = F \cdot \cos \alpha$, где α — угол между вектором силы $\vec{F}$ и вектором перемещения $\Delta \vec{x}$ ③. Тогда $A = F \Delta x \cos \alpha$.

Работа силы $\vec{F}$ при перемещении $\Delta \vec{x}$ равна произведению модулей этих векторов и косинуса угла между ними. Знак работы определяется знаком $\cos \alpha$.

Работа силы положительна ($A_1 > 0$), если угол α острый ($0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$), $\cos \alpha > 0$ ④.

Работа силы отрицательна ($A_2 < 0$), если угол α тупой ($90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$), $\cos \alpha < 0$ ⑤.

Работа силы, перпендикулярной перемещению ($\alpha = 90^\circ$), равна нулю, $\cos 90^\circ = 0$ ⑥.

В качестве примера найдем работу сил, действующих на тело, соскальзывающее с наклонной плоскости ⑦. На скользящее тело действует сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$.

Работа силы реакции, перпендикулярной перемещению Δx , равна нулю.

Работа силы трения отрицательна: $A_{\text{тр.}} = F_{\text{тр.}} \Delta x \cos 180^\circ = -F_{\text{тр.}} \Delta x < 0$.

Работа силы тяжести зависит от высоты плоскости и не зависит от угла ее наклона: $A_g = mgl \cdot \cos(90^\circ - \alpha) = mgH$.

Сила тяжести — потенциальная сила — сила, работа которой при перемещении материальной точки зависит только от начального и конечного положений точки в пространстве (но не зависит от формы траектории) ⑧.

Полная работа силы тяжести при перемещении частицы из точки 0 в точку 1 по двум прямолинейным участкам 0–2 и 2–1: $A = A_{0-2} + A_{2-1} = mgh_1 + mgh_2 = mgH$.

При движении тела по произвольной траектории между точками 0 и 1 работа силы тяжести также равна mgH .

Тело массой m можно равномерно поднять на высоту H , совершив одну и ту же работу mgH двумя способами:

1) приложив силу, равную mg по вертикали,

2) приложив меньшую силу, равную $mg \sin \alpha$, вдоль наклонной плоскости.

Применение наклонных лестниц позволяет уменьшить усилия при подъеме.

Скорость совершения работы характеризует

средняя мощность — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, за который она совершена:

$$P_{\text{ср.}} = \frac{A}{t}.$$

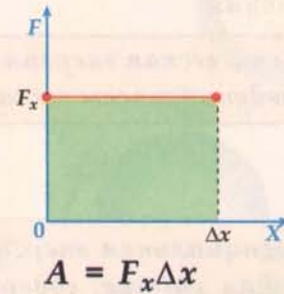
Единица мощности — *ватт* (Вт): $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

РАБОТА КАК ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ



Работа – скалярная физическая величина, равная произведению проекции силы на ось X на перемещение по этой оси: $A = F_x \Delta x$

② Геометрический смысл работы – площадь под кривой $F_x(x)$

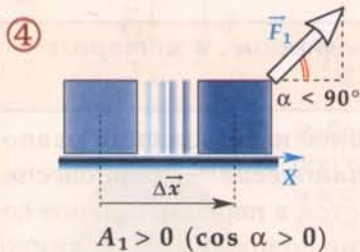


Зависимость знака работы от взаимной ориентации силы и перемещения

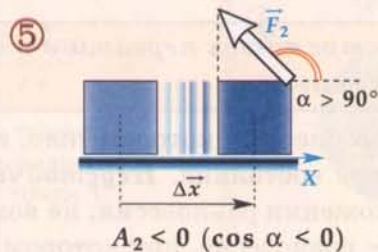
③ Работа силы $\vec{F}$ при перемещении на $\Delta\vec{x}$ равна произведению модулей этих векторов и косинуса угла между ними:

$$A = F_x \Delta x \cos \alpha$$

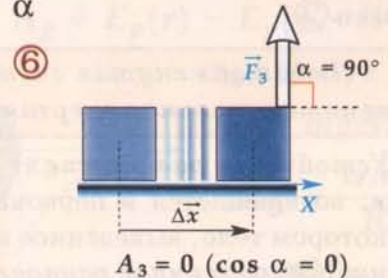
Знак работы определяется знаком $\cos \alpha$



Работа силы положительна, если угол α острый ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)



Работа силы отрицательна, если угол α тупой ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$)



Работа силы, перпендикулярной перемещению, равна нулю ($\alpha = 90^\circ$)

РАБОТА СИЛ РЕАКЦИИ, ТРЕНИЯ, ТЯЖЕСТИ

Работа сил, действующих на тело, соскальзывающее с наклонной плоскости



$$A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \Delta x \cos 180^\circ = -F_{\text{тр}} \Delta x$$

$$A_{\text{тр}} = -\mu mgH \operatorname{ctg} \alpha < 0$$

Работа силы трения отрицательна

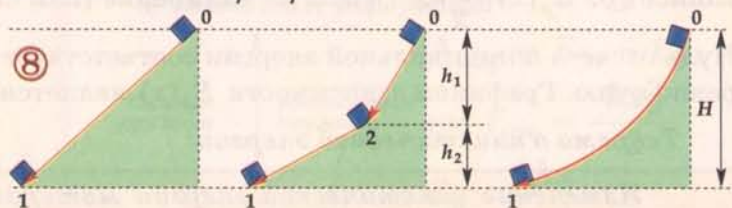
$$A_g = mgl \cos (90^\circ - \alpha) = mgH$$

Работа силы тяжести не зависит от угла наклона плоскости

На скользящее тело действует сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$

Сила тяжести – потенциальная сила

Потенциальная сила – сила, работа которой при перемещении материальной точки зависит только от начального и конечного положений точки в пространстве



$$A_g = A_{0-2} + A_{2-1}$$

$$A_g = mgh_1 + mgh_2 = mgH$$

Работа силы тяжести не зависит от формы траектории при перемещении тела из точки 0 в точку 1

Снижение физических усилий при применении наклонных лестниц



§15. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Энергия является физической величиной, характеризующей способность тела (или системы тел) совершать работу при изменении своего состояния. **Полная механическая энергия** E тела (системы тел) складывается из кинетической и потенциальной энергии: $E = E_k + E_p$.

Кинетическая энергия обусловлена движением тел, а потенциальная зависит от их взаимного положения.

Кинетическая энергия тела — скалярная физическая величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2.$$

Потенциальная энергия тела в данной точке — скалярная физическая величина, равная работе, совершаемой потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в точку, принятую за нуль отсчета потенциальной энергии ①.

Нуль отсчета потенциальной энергии выбирается произвольно. Работа силы тяжести, как и любой потенциальной силы, определяется разностью потенциальных энергий в начальном и конечном состояниях: $A_g = E_{p1} - E_{p2}$. Потенциальная энергия материальной точки массой m , поднятой на высоту H над нулем отсчета: $E_p = mgH$. **Принцип минимума потенциальной энергии** ②:

Любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором ее потенциальная энергия минимальна.

Устойчивое равновесие — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, возвращается в первоначальное состояние. **Неустойчивое равновесие** — равновесие, при котором тело, выведенное из положения равновесия, не возвращается в первоначальное состояние. **Безразличное равновесие** — равновесие, при котором соседние положения тела также являются равновесными.

Потенциальная энергия тела массой m , находящегося в поле тяжести Земли на расстоянии r от ее центра ③, имеет вид: $E_p(r) = -GmM_{\oplus}/r$ ④. Нуль отсчета потенциальной энергии выбран на бесконечно большом расстоянии от центра Земли. Графиком зависимости $E_p(r)$ является отрицательная гипербола. Потенциальная энергия упругодеформированной пружины равна работе силы упругости при переходе пружины из деформированного состояния в недеформированное ⑤: $E_p(x) = \frac{1}{2}kx^2$, где x — удлинение (или сжатие) пружины, k — жесткость пружины.

Нуль отсчета потенциальной энергии соответствует нерастянутой пружине, удлинение которой равно нулю. Графиком зависимости $E_p(x)$ является парабола ⑥.

Теорема о кинетической энергии:

Изменение кинетической энергии материальной точки равно работе всех сил, действующих на эту точку:

$$E_k - E_{k0} = A.$$

Консервативная система — механическая система, в которой действуют только потенциальные силы. Закон сохранения механической энергии:

В консервативной системе полная механическая энергия сохраняется (не изменяется со временем):

$$E_k + E_p = E_{k0} + E_{p0}.$$

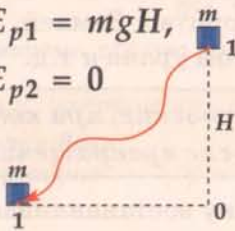
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Работа потенциальной силы – силы тяжести

$$A_p = E_{p1} - E_{p2},$$

где E_{p1} , E_{p2} – потенциальная энергия тела в начальном и конечном положениях

Потенциальная энергия Выбор нуля отсчета тела в данной точке – скалярная физическая величина, равная работе, совершаемой потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в точку, принятую за нуль отсчета потенциальной энергии

$$E_{p1} = mgH, \quad E_{p2} = 0$$


Принцип минимума потенциальной энергии

Любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором ее потенциальная энергия минимальна

② Равновесие шара на опоре:

а) устойчивое

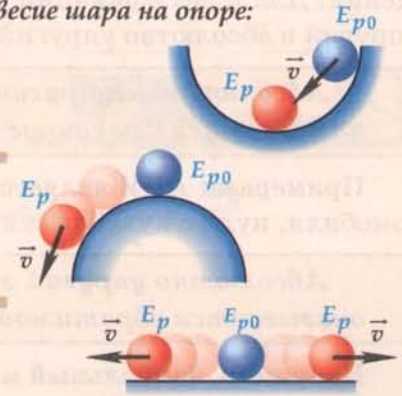
$$E_p < E_{p0}$$

б) неустойчивое

$$E_p < E_{p0}$$

в) безразличное

$$E_p = E_{p0}$$



РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

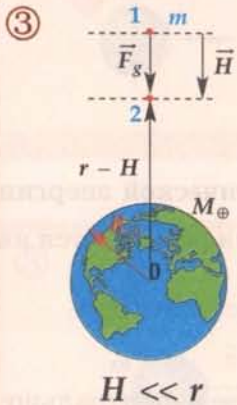
Перемещение тела к Земле под действием силы тяжести

Сила тяжести тела на расстоянии r

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{r^2}$$

Работа силы тяжести при перемещении тела массой m из точки 1 в точку 2

$$A_g = F_g H \cos 0^\circ = G \frac{mM_{\oplus}}{r^2} H$$



Потенциальная энергия тела в гравитационном поле

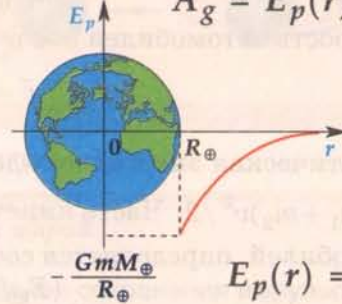
Зависимость потенциальной энергии тела от расстояния между телом и центром Земли

$$A_g = E_p(r) - E_p(r - H)$$

При $H \ll r$

$$A_g = mgH,$$

$$\text{где } g = \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$$



Начало отсчета потенциальной энергии находится на бесконечно большом расстоянии от центра Земли

РАБОТА СИЛЫ УПРУГОСТИ

⑤ Работа силы упругости при растяжении и сжатии пружины:

а) нерастянутая пружина длиной l_0 ($\Delta x_0 = 0$)

$$F_{\text{упр}} = 0$$

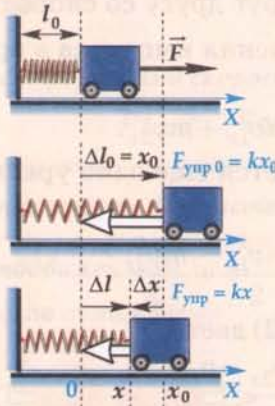
б) растянутая пружина длиной $l_0 + \Delta l_0$ ($\Delta l_0 = x_0$)

$$F_{\text{упр}0} = kx_0$$

в) сжимающаяся пружина длиной $l_0 + \Delta l$ ($\Delta l = x$)

$$F_{\text{упр}} = kx$$

$$A_{\text{упр}} = \frac{k}{2} (x_0 + x)(x_0 - x) = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}$$



Потенциальная энергия тела при упругом взаимодействии

⑥ Зависимость потенциальной энергии упругой пружины от ее деформации

$$A_{\text{упр}} = E_{p0} - E_p,$$

$$\text{где } E_{p0} = \frac{kx_0^2}{2}$$

$$E_p = \frac{kx^2}{2},$$

где x – удлинение (или сжатие) пружины,

k – жесткость пружины



Начало отсчета потенциальной энергии ($E_p = 0$) соответствует нерастянутой пружине, удлинение x которой равно нулю

Глава 3. Законы сохранения

§16. АБСОЛЮТНО НЕУПРУГОЕ И АБСОЛЮТНО УПРУГОЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Под столкновением в физике понимают взаимодействие тел при их относительном перемещении. Для классификации реальных столкновений вводят физические модели: абсолютно неупругий и абсолютно упругий удар.

Абсолютно неупругий удар (АНУ) — столкновение, в результате которого тела движутся как единое целое.

Примерами АНУ является столкновение метеорита с Землей, мухи с лобовым стеклом автомобиля, пули с кучей песка, захват нейтрона ядром урана и т.д.

Абсолютно упругий удар (АУУ) — столкновение, при котором деформация тел оказывается обратимой, т.е. исчезающей после прекращения взаимодействия.

Например, футбольный мяч после удара о стенку восстанавливает шарообразную форму. Абсолютно упруго сталкиваются многие элементарные частицы, бильярдные шары, теннисный мяч с ракеткой.

Рассмотрим подробнее абсолютно неупругое столкновение грузовика массой m_1 , движущегося со скоростью v_0 , с легковым автомобилем массой m_2 , стоящим у светофора ①. Закон сохранения импульса для такой замкнутой системы имеет вид:

$$m_1 \vec{v}_0 = (m_1 + m_2) \vec{v},$$

где $\vec{v}$ — общая скорость автомобилей после удара:

$$\vec{v} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{v}_0.$$

При АНУ кинетическая энергия тел до удара $E_{k0} = m_1 v_0^2 / 2$ больше кинетической энергии после удара $E_k = (m_1 + m_2) v^2 / 2$. Часть кинетической энергии грузовика, которая расходуется на деформацию автомобилей, определяется соотношением

$$\gamma = \frac{(E_{k0} - E_k)}{E_{k0}} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2)}.$$

Согласно современным представлениям Луна могла возникнуть в результате нецентрального неупругого столкновения Земли с протопланетой размера Марса, в результате которого часть силикатной мантии была выброшена в пространство ②. Постепенно из части мантии, оставшейся на земной орбите, в результате гравитационного притяжения образовалась Луна.

В качестве примера АУУ рассмотрим столкновение двух бильярдных шаров, имеющих одинаковую массу m и движущихся навстречу друг другу со скоростями $\vec{v}_{10}$ и $\vec{v}_{20}$ ③. Найдем скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ шаров после удара. Закон сохранения импульса в проекции на ось X для замкнутой системы шаров имеет вид:

$$mv_{10} + mv_{20} = mv_{1x} + mv_{2x}. \quad (1)$$

Для однозначного определения v_1 и v_2 требуется еще одно уравнение — закон сохранения энергии:

$$\frac{mv_{10}^2}{2} + \frac{mv_{20}^2}{2} = \frac{mv_{1x}^2}{2} + \frac{mv_{2x}^2}{2}. \quad (2)$$

Совместное решение системы уравнений (1), (2) дает:

$$v_{1x} = -v_{20}; \quad v_{2x} = v_{10}.$$

В результате АУУ одинаковые шары обмениваются проекциями скорости на линию, соединяющую их центры.

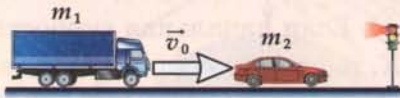
Скорости тел различной массы после АУУ зависят от соотношения масс тел ④, ⑤.

АБСОЛЮТНО НЕУПРУГИЙ УДАР

①

Абсолютно неупругое столкновение грузовика с легковым автомобилем

а) до столкновения



Закон сохранения импульса для замкнутой системы тел "автомобиль – грузовик"

$$m_1 \vec{v}_0 = (m_1 + m_2) \vec{v},$$

где v – их общая скорость после удара

$$\vec{v} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{v}_0$$

б) после столкновения



$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

Перегрузка, испытываемая пассажирами, обратно пропорциональна массе автомобиля

При абсолютно неупругом ударе кинетическая энергия не сохраняется

Часть кинетической энергии грузовика, которая расходуется на деформацию автомашин

$$\gamma = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ

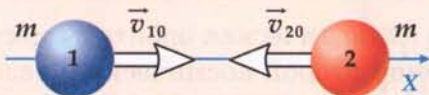


АБСОЛЮТНО УПРУГИЙ УДАР

③

Упругий удар бильярдных шаров:

а) до столкновения



Закон сохранения импульса в проекции на ось X для замкнутой системы шаров:

$$mv_{10} - mv_{20} = mv_{1x} + mv_{2x}$$

б) после столкновения



Закон сохранения энергии:

$$\frac{mv_{10}^2}{2} + \frac{mv_{20}^2}{2} = \frac{mv_{1x}^2}{2} + \frac{mv_{2x}^2}{2}$$

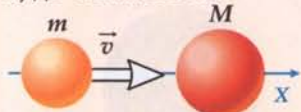
Шары обмениваются проекциями скорости на линию, соединяющую их центры

$$v_{1x} = -v_{20}; \quad v_{2x} = v_{10}$$

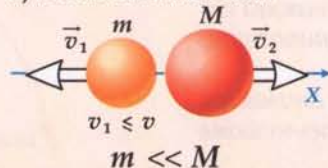
Столкновение шарика для настольного тенниса с бильярдным шаром

④ До столкновения неподвижен шар

а) до столкновения

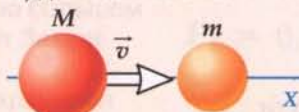


б) после столкновения

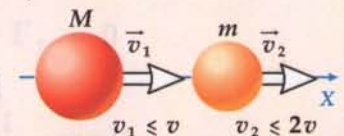


⑤ До столкновения неподвижен шарик

а) до столкновения



б) после столкновения



§17. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Траектории движения астрономических тел в гравитационном поле притяжения зависят от их относительных скоростей. Рассмотрим возможные траектории, по которым могут двигаться тела в поле тяжести Земли, при различных начальных скоростях ①. Если начальная скорость тела, находящегося на высоте H над поверхностью Земли в точке K , равна нулю (либо направлена к центру Земли), тело свободно падает на Землю по **прямой** KF_1 (F_1 — центр Земли) вдоль силы тяжести $m\vec{g}$. При вылете снаряда в направлении оси X , перпендикулярном KF_1 , со скоростью v_1 , он движется по **эллиптической орбите**, вытянутой вдоль KF_1 . (На рисунке ① приведен наиболее простой способ построения эллипса. Разные концы одной нити привязывают к двум булавкам, воткнутым в двух точках F_1 и F_2 , называемых фокусами. Затем карандашом, натягивающим нить, соединяют все возможные точки). С увеличением начальной скорости по оси X ($v_2 > v_1$) снаряд, двигаясь по эллипсу с нижним фокусом F_1 в центре Земли падает на большем расстоянии. Начиная с некоторой скорости v_1 , называемой первой космической (или круговой) скоростью, тело не падает на Землю, а движется вокруг нее по **круговой орбите** ②.

Первая космическая (круговая) скорость — скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы тело могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите.

Второй закон Ньютона при движении тела массой m вблизи поверхности Земли ($m \ll M_\oplus$) имеет вид: $mv_1^2/r = mg$.

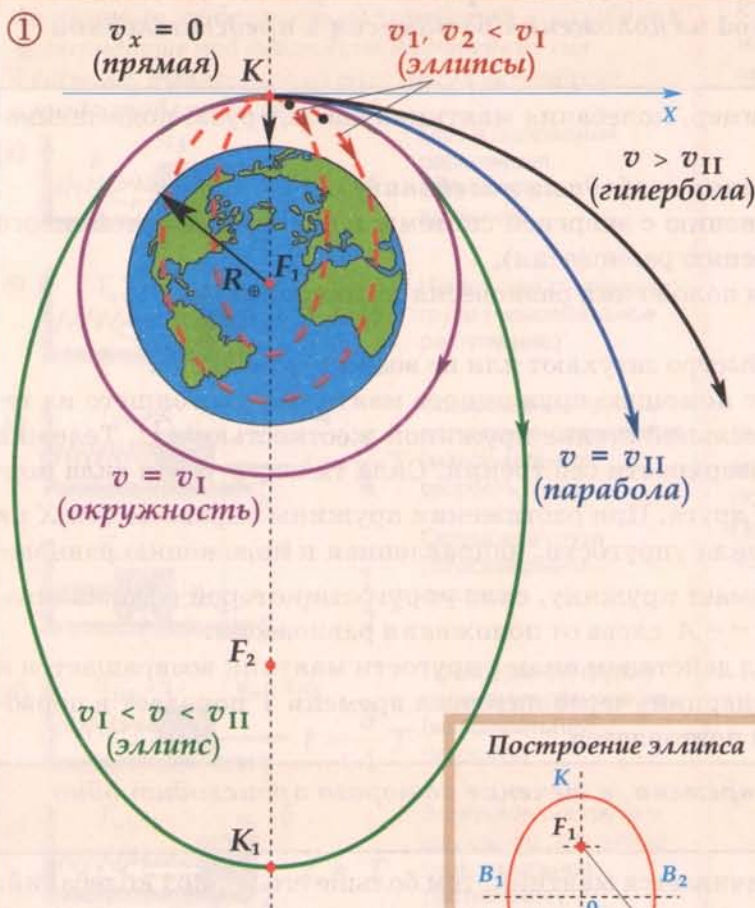
Тогда **первая космическая скорость** $v_1 = \sqrt{gR} = 7,9 \text{ км/с}$.

Если начальная скорость тела превысит круговую скорость ($v > v_1$), то оставаясь спутником Земли, тело движется по эллиптической орбите, вытянутой перпендикулярно направлению начальной скорости (оси X), с перигеем F_1K и апогеем F_1K_1 . При дальнейшем увеличении скорости запуска тело все дальше удаляется от Земли. При этом эллиптическая орбита существенно вытягивается. Начиная с некоторой скорости v_{II} , называемой второй космической, тело, преодолев гравитационное притяжение, способно удалиться от Земли на бесконечно большое расстояние ③.

Вторая космическая скорость — минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли для того, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Земли.

Ракета, запущенная с поверхности Земли со второй космической скоростью, движется по **параболической траектории**. Из закона сохранения механической энергии следует, что **вторая космическая скорость** $v_{II} = \sqrt{2gR_\oplus} = 11,2 \text{ км/с}$. При запуске ракеты со скоростью, большей второй космической ($v > v_{II}$), ракета, преодолев гравитационное притяжение, движется по **гиперболической траектории**.

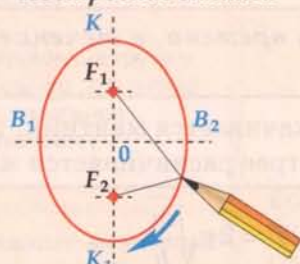
Траектория снарядов, вылетающих горизонтально, вблизи поверхности Земли с различной скоростью



v_I –
первая космическая скорость

v_{II} –
вторая космическая скорость

Построение эллипса

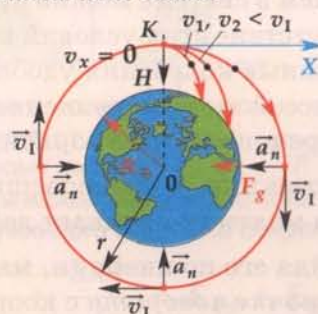


F_1, F_2 – фокусы эллипса
 F_1K – перигей орбиты
 F_1K_1 – апогей орбиты

ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

② Первая космическая (круговая) скорость – скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли (или небесного тела) для того, чтобы тело могло двигаться вокруг Земли (или небесного тела) по круговой орбите

Траектория движения тел, имеющих начальную скорость, не превышающую первую космическую скорость, в гравитационном поле Земли



Гравитационная сила

$$F_g = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + H)^2}$$

Центростремительное ускорение

$$a_n = \frac{v^2}{R_{\oplus} + H}$$

По второму закону Ньютона

$$m \frac{v^2}{R_{\oplus} + H} = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + H)^2}$$

При $H \ll R_{\oplus}$

$$v_I = \sqrt{2gR_{\oplus}} = 7,9 \text{ км/с}$$

ВТОРАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

③ Вторая космическая скорость – минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли (или небесного тела) для того, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Земли (или небесного тела)

$$v_{II} = \sqrt{2gR_{\oplus}} = 11,2 \text{ км/с}$$

Параболическая траектория ракеты, удаляющейся от Земли со второй космической скоростью



При запуске тела

$$E_{k0} = \frac{mv_{II}^2}{2}, \quad E_{p0} = -mgR_{\oplus}$$

На бесконечно большом расстоянии от Земли

$$E_k = 0, \quad E_p = 0$$

Из закона сохранения механической энергии

$$0 = \frac{mv_{II}^2}{2} - mgR_{\oplus}$$

§18. ДИНАМИКА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Свободные (собственные) колебания — колебания, происходящие под действием внутренних сил в системе, выведенной из положения равновесия и представленной самой себе.

Таковыми колебаниями являются, например, колебания маятника часов, груза, подвешенного на пружине, шарика на нити.

Необходимые условия для возникновения свободных колебаний:

- наличие энергии, избыточной по сравнению с энергией системы в положении устойчивого равновесия (для возвращения к положению равновесия),
- наличие инертности (для прохождения положения равновесия по инерции),
- трением в системе можно пренебречь.

В отсутствие этих условий колебания быстро затухают или не возникают вообще.

Свободные колебания удобно изучать с помощью пружинного маятника, состоящего из тележки массой m , прикрепленной к вертикальной стенке пружиной жесткостью k ①. Тележка может перемещаться по горизонтальной поверхности без трения. Сила тяжести $m\vec{g}$ и сила нормальной реакции $\vec{N}$ уравниваются друг друга. При растяжении пружины вправо по оси X на $x_0 = A$ на маятник начинает действовать сила упругости, направленная к положению равновесия. Пройдя его по инерции, маятник сжимает пружину, сила упругости которой останавливает тело в **точке поворота** с координатой $x = -A$ слева от положения равновесия.

A — **амплитуда колебаний**. Затем под действием силы упругости маятник возвращается к положению равновесия и, пройдя его по инерции, через интервал времени T попадает в первоначальное положение и процесс колебаний повторяется.

Период колебаний T — интервал времени, в течение которого происходит одно полное колебание.

Чем больше масса, тем медленнее раскачивается маятник, тем больше его период колебаний. Чем больше жесткость пружины, тем быстрее раскачивается маятник, тем меньше его период:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Свободные колебания пружинного маятника являются гармоническими, т.е.

$$x = A \cos 2\pi t/T.$$

В отсутствие сил трения колебательная система является консервативной, поэтому для нее выполняется закон сохранения полной механической энергии ②:

$$E = E_{k0} + E_{p0}.$$

В начальный момент времени для маятника, отклоненного на расстояние A и отпущенного со скоростью $v_0 = 0$, кинетическая энергия равна нулю, а потенциальная энергия $E_{p0} = kA^2/2$. Полная механическая энергия гармонических колебаний пропорциональна квадрату их амплитуды:

$$E = kA^2/2.$$

С ростом энергии колебаний возрастает их амплитуда: $A = \sqrt{2E/k}$. Чем жестче пружина (чем больше k), тем меньше амплитуда колебаний.

Механической аналогией колебаний пружинного маятника является движение шарика без трения в параболической воронке ③. Приравнявая гравитационную энергию шарика массой m на высоте y , потенциальной энергии пружинного маятника на расстоянии x от положения равновесия: $mgy = \frac{kx^2}{2}$, получаем профиль воронки: $y = \frac{kx^2}{2mg}$.

① СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Свободные (собственные) колебания – колебания, происходящие под действием внутренних сил в системе, выведенной из положения равновесия и предоставленной самой себе



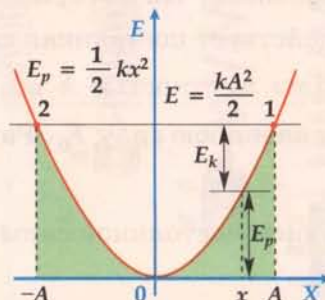
Период свободных колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Период свободных колебаний пружинного маятника не зависит от начальных условий (амплитуда, скорость), а полностью определяется собственными характеристиками колебательной системы (жесткостью k и массой m)

② ЭНЕРГИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

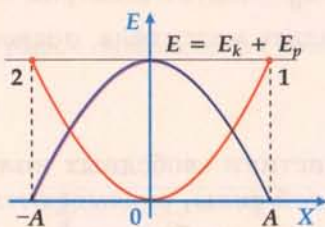
Кинетическая, потенциальная и полная механическая энергия при свободных гармонических колебаниях



Потенциальная энергия пружинного маятника зависит от координаты по квадратичному закону: $E_p = \frac{kx^2}{2}$

Полная механическая энергия гармонических колебаний пружинного маятника сохраняется:

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = E_{k0} + E_{p0}$$



Если при $t = 0$ маятник отклонен на расстояние $x_0 = A$ и отпущен со скоростью $v_0 = 0$, то $E_{k0} = 0$

$$E = E_{p0} = \frac{kx_0^2}{2}$$

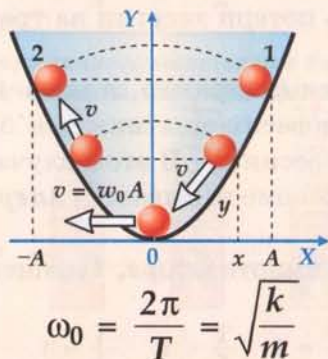
Полная механическая энергия гармонических колебаний пропорциональна квадрату их амплитуды:

$$E = \frac{kA^2}{2}$$

1, 2 – точки поворота ($x = A, v = 0$)

МЕХАНИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

③



Колебания шарика в параболической воронке

$$mgy = \frac{kx^2}{2}$$

$$y = \frac{kx^2}{m2g} = \frac{\omega_0^2 x^2}{2g}$$

$$y_{\max} = \frac{(\omega_0 A)^2}{2g} = \frac{v_{\max}^2}{2g}$$

§19. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ СИЛ, НЕ ЗАВИСЯЩИХ ЯВНО ОТ ВРЕМЕНИ

В качестве физической модели колебательной системы будем использовать пружинный маятник. Предположим, что на горизонтальный пружинный маятник, находящийся в положении равновесия, действует постоянная сила $\vec{F}_0$, направленная вдоль оси X ($F_{\text{тр}} = 0$) ①. При растяжении пружины жесткостью k возрастает сила упругости $F_{\text{упр}}$, которая при удлинении x_0 компенсирует внешнюю силу F_0 . Равновесие возникает при условии равенства сил:

$$F_{\text{упр}} = kx_0 = F_0.$$

Под действием постоянной силы F_0 положение равновесия маятника смещается на

$$x_0 = \frac{F_0}{k}.$$

Статическое смещение — изменение положения равновесия колебательной системы под действием постоянной силы.

Предположим теперь, что постоянная сила $\vec{F}_0 = m\vec{g}$ — силе тяжести груза — действует на вертикальный пружинный маятник ②. Статическое смещение оказывается пропорционально массе груза: $x_0 = mg/k$. Измеряя статическое смещение пружины с известной жесткостью, можно определить массу тела, подвешенного на пружине:

$$m = \frac{kx_0}{g}.$$

Характеристики свободных колебаний, возникающих в системе, находящейся под действием постоянной силы, оказываются такими же, как и в ее отсутствие. Единственное отличие состоит в том, что колебания возникают и происходят относительно нового положения равновесия — статического смещения.

Колебания вертикального пружинного маятника в воздухе из-за малой силы сопротивления воздуха являются практически гармоническими ③. Колебательное движение маятника в более плотной среде, например, в воде, сопровождается трением ④. Сила трения, направленная противоположно перемещению маятника, совершает отрицательную работу, уменьшая его механическую энергию. Постоянное уменьшение энергии приводит к непрерывному уменьшению амплитуды колебаний. Колебания маятника в воде становятся затухающими.

Затухающие колебания — колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

Примером таких колебаний являются колебания маятника незаведенных механических часов. Энергия сжатой пружины не может компенсировать потери энергии на трение в опоре и о воздух.

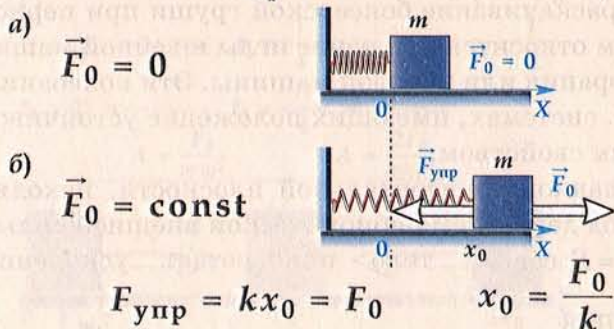
Сопротивление движению маятника в вязкой жидкости (например, в масле) оказывается столь значительным, что выведенный из положения равновесия маятник так быстро теряет энергию, что не возвращается обратно к положению равновесия ⑤. В этом случае периодических колебаний не возникает. Такое неповторяющееся движение называется **апериодическим**, т.е. не имеющим периода.

Апериодическим является движение в масле поршня амортизатора, гасящего колебания кузова автомобиля на неровной дороге.

Колебательная система под действием внешних сил, не зависящих явно от времени

① ПОСТОЯННАЯ СИЛА

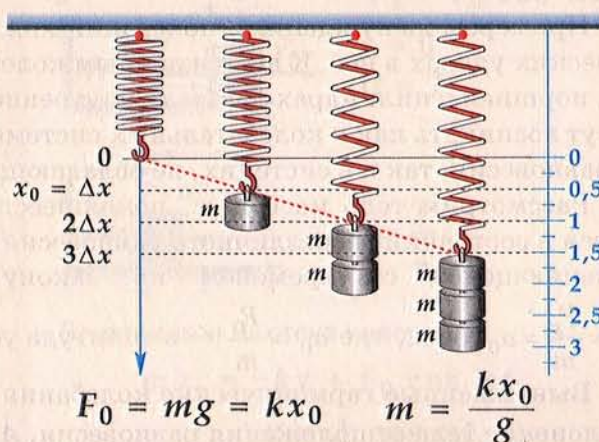
Пружинный маятник под действием постоянной силы $F_{\text{гр}} = 0$:



Статическое смещение – изменение положения равновесия колебательной системы под действием постоянной силы

② СИЛА ТЯЖЕСТИ

Измерение массы тела по статическому смещению



СИЛА ТРЕНИЯ

③ Колебания пружинного маятника в воздухе

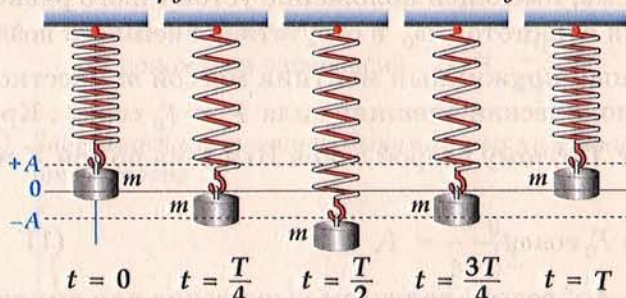
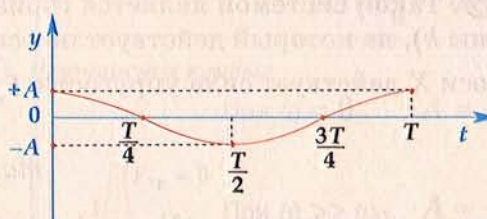


График гармонических колебаний



④ Колебания пружинного маятника в воде

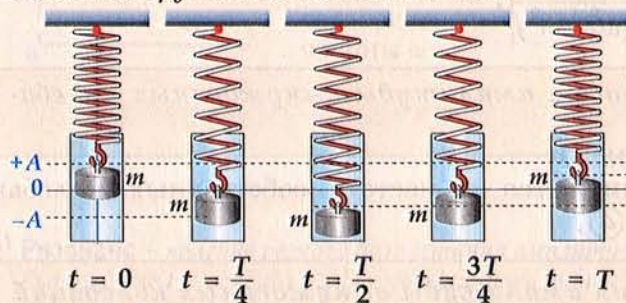
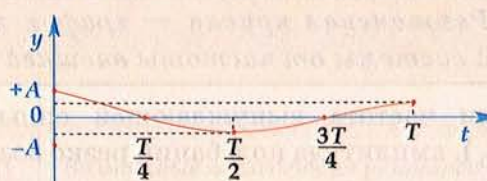


График затухающих колебаний



⑤ Движения пружинного маятника в вязкой жидкости

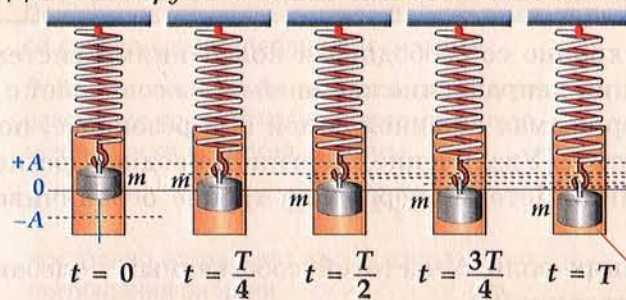
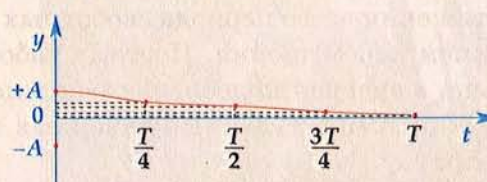


График аperiodического движения



§20. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

Вынужденные колебания — колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

Примером вынужденных колебаний является раскачивание боксерской груши при периодических ударах в нее. К вынужденным колебаниям относится движение иглы швейной машины, поршней в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания или паровой машины. Эти колебания могут возникать как в колебательных системах, т.е. системах, имеющих положение устойчивого равновесия, так и в системах, не обладающих этим свойством.

Рассмотрим тело массой m , покоящееся на гладкой горизонтальной плоскости, находящееся в состоянии безразличного равновесия ①. Под действием периодической внешней силы, изменяющейся со временем по закону: $F_x = F_0 \cos \omega t$, тело приобретает ускорение

$$a_x = \frac{F_x}{m} = a_0 \cos \omega t, \text{ где } a_0 = \frac{F_0}{m} \text{ — амплитуда ускорения.}$$

Вынужденные гармонические колебания тела совершаются по закону $x = A \cos \omega t$, где x — отклонение тела от положения равновесия, A — амплитуда колебаний. Для гармонических колебаний их амплитуда связана с амплитудой ускорения ②:

$$A = \frac{a_0}{\omega^2} = \frac{F_0}{m\omega^2}.$$

Амплитуда вынужденных колебаний обратно пропорциональна квадрату частоты.

Рассмотрим вынужденные колебания в системе, имеющей положение устойчивого равновесия, в которой возможны собственные колебания с частотой ω_0 в отсутствие внешнего воздействия ③. Такой системой является горизонтальный пружинный маятник массой m (жесткость пружины k), на который действует по оси X периодическая внешняя сила $F_x = F_0 \cos \omega t$. Кроме нее по оси X действует сила упругости $F_{\text{упр}} = -kx$. Поэтому второй закон Ньютона по оси X имеет вид:

$$ma_x = -kx + F_0 \cos \omega t. \quad (1)$$

Подставляя в формулу (1) $x = A \cos \omega t$, $a_x = -A\omega^2 \cos \omega t$, получаем выражение для амплитуды A вынужденных колебаний:

$$A = \left| \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right|.$$

Резонансная кривая — график зависимости амплитуды вынужденных колебаний системы от частоты внешней силы.

Если частота вынуждающей силы приближается к частоте собственных колебаний ($\omega \rightarrow \omega_0$), амплитуда колебаний резко возрастает ④.

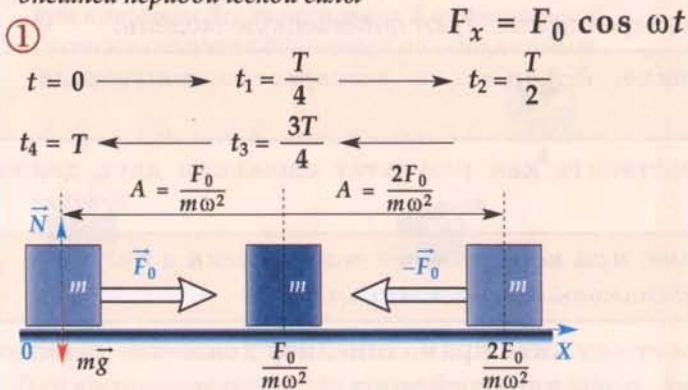
Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с частотой собственных колебаний системы ⑤.

При резонансе внешняя сила действует синхронно со свободными колебаниями системы. На протяжении всего периода свободных колебаний направление внешней силы совпадает с направлением перемещения. Поэтому работа, совершаемая внешней силой при резонансе, положительна, а энергия колеблющегося тела возрастает. Увеличение энергии приводит к резкому возрастанию амплитуды вынужденных колебаний. Потери энергии на трение ограничивают эту амплитуду.

Резонансное совпадение частоты сейсмических волн с частотой собственных колебаний зданий приводит к их разрушениям при землетрясениях ⑥.

СИСТЕМА, НАХОДЯЩАЯСЯ В СОСТОЯНИИ БЕЗРАЗЛИЧНОГО РАВНОВЕСИЯ

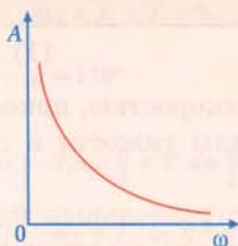
Вынужденные колебания тела массой m , находящегося в состоянии безразличного равновесия, под действием внешней периодической силы



Согласно второму закону Ньютона, ускорение тела $a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{F_0}{m} \cos \omega t$, где $\frac{F_0}{m} = a_0$ – амплитуда ускорения тела.

Вынужденные гармонические колебания тела совершаются по закону $x = A \cos \omega t$, где x – отклонение тела от положения равновесия $A = \frac{a_0}{\omega^2}$

② Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты

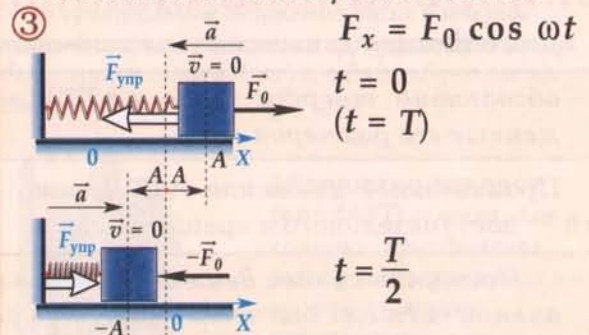


$$A = \frac{F_0}{m\omega^2}$$

Амплитуда вынужденных колебаний обратно пропорциональна квадрату частоты ω

СИСТЕМА, ИМЕЮЩАЯ ПОЛОЖЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСИЯ (КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА)

Вынужденные колебания пружинного маятника под действием внешней периодической силы



Второй закон Ньютона имеет вид

$$ma_x = -kx + F_0 \cos \omega t$$

Подставляя

$$\begin{cases} x = A \cos \omega t, \\ a_x = -\omega^2 A \cos \omega t, \\ k = -m\omega_0^2, \end{cases}$$

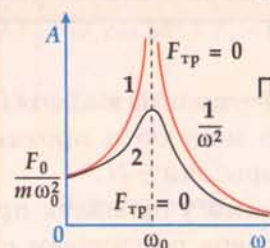
получаем выражение для амплитуды вынужденных колебаний

$$A = \left| \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right|$$

④ Резонансные кривые

При $\omega = 0$, $A = \frac{F_0}{m\omega_0^2}$

При $\omega \gg \omega_0$, $A \approx \frac{F_0}{m\omega^2}$



1 – при отсутствии трения
2 – при наличии трения

РЕЗОНАНС

⑤ Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с частотой собственных колебаний системы

При резонансе внешняя сила действует синхронно со свободными колебаниями системы

Работа, совершаемая внешней силой, при резонансе положительна, поэтому полная механическая энергия системы

$$E = E_0 + F_x \Delta x$$

постоянно возрастает из-за резонансного поглощения энергии

⑥ Возможные последствия резонанса

Разрушение зданий в Кобе (Япония) в результате землетрясения в 1995 г.



§21. УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ ДЛЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Для описания движения тела конечных размеров используют физическую модель:

абсолютно твердое тело (АТТ) — тело, деформации которого значительно меньше его размеров.

Произвольное движение АТТ можно представить как результат сложения двух движений — поступательного и вращательного.

Поступательное движение — движение, при котором все точки тела в инерциальной системе отсчета движутся по одинаковым траекториям ①.

Примером поступательного движения может служить прямолинейное движение реактивного истребителя, поезда на магнитной подушке, подводной лодки и т.д.

Статика — раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел. Для выяснения условий равновесия для поступательного движения АТТ выделим две произвольные точки A_1 и B_1 , соединив их вектором $\overrightarrow{A_1B_1}$. При поступательном движении АТТ вектор, соединяющий две произвольные точки тела, перемещается параллельно самому себе, не изменяясь по длине: $\overrightarrow{A_1B_1} = \overrightarrow{A_2B_2}$. Равенство перемещений точек A_1 и B_1 за одинаковый промежуток времени означает равенство их скоростей и ускорений. Условием отсутствия поступательного движения, или **условием статического равновесия для поступательного движения**, является равенство нулю ускорения тела: $\vec{a} = 0$ ②. Используя второй закон Ньютона, $m\vec{a} = \sum \vec{F}$, можно сформулировать **условие отсутствия поступательного движения**:

Поступательное движение тела в инерциальной системе отсутствует, если векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\sum \vec{F} = 0. \quad (1)$$

Например, чемодан, стоящий в лифте, поднимающемся с постоянной скоростью, покоится вследствие равенства по модулю и противоположной направленности силы тяжести и силы нормальной реакции опоры: $mg = N$.

Условие (1) необходимо учитывать при проектировании элементов строительных конструкций. В качестве примера рассчитаем силы натяжения $\vec{T}_1$ в симметричных растяжках, на которых подвешен светофор массой m ③. Угол α между растяжками равен 120° . На светофор действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$ в растяжках. Условие статического равновесия светофора имеет вид:

$$m\vec{g} + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 = 0. \quad (2)$$

Направим координатную ось X по горизонтали вправо, а ось Y вертикально вверх. Запишем равенство (2) в проекциях на оси X и Y :

$$\begin{cases} (X) & -T_1 \sin \frac{\alpha}{2} + T_2 \sin \frac{\alpha}{2} = 0, \\ (Y) & -mg + T_1 \sin \frac{\alpha}{2} + T_2 \sin \frac{\alpha}{2} = 0. \end{cases}$$

Из первого уравнения системы следует, что $T_1 = T_2$. Из второго уравнения получаем:

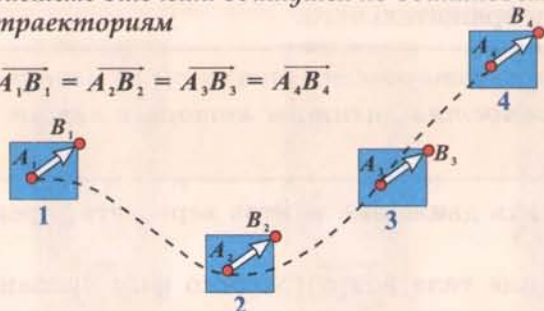
$$T_1 = T_2 = \frac{mg}{(2 \cos \frac{\alpha}{2})}.$$

Аналогично рассчитываются силы натяжения T_1 и T_2 в растяжках люстры ④.

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

- ① Поступательное движение – движение, при котором все точки тела в инерциальной системе отсчета движутся по одинаковым траекториям

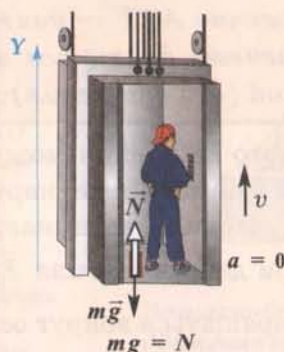
$$\overrightarrow{A_1B_1} = \overrightarrow{A_2B_2} = \overrightarrow{A_3B_3} = \overrightarrow{A_4B_4}$$



При поступательном движении вектор, соединяющий две произвольные точки, перемещается параллельно самому себе, не изменяясь по длине.

УСЛОВИЕ ОТСУТСТВИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

- ② Поступательное движение тела в инерциальной системе отсчета отсутствует, если векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю: $\sum \vec{F} = 0$

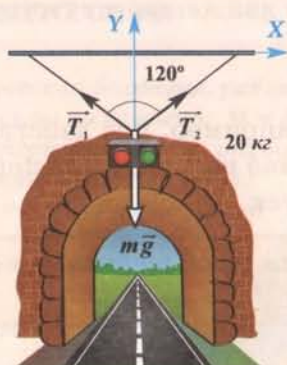


Абсолютно твердое тело (АТТ) – тело, для которого расстояние между любыми точками можно считать неизменным.

Равновесие чемодана в равномерно поднимающемся лифте

СТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ ДЛЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

③



$$m\vec{g} + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 = 0$$

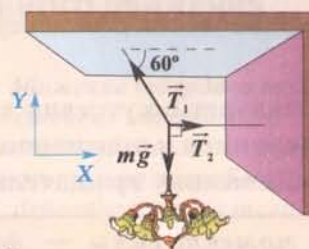
$$\alpha = 120^\circ$$

$$(X) \quad -T_1 \sin \frac{\alpha}{2} + T_2 \sin \frac{\alpha}{2} = 0$$

$$(Y) \quad -mg + T_1 \cos \frac{\alpha}{2} + T_2 \cos \frac{\alpha}{2} = 0$$

$$T_1 = T_2 = \frac{mg}{2 \cos \frac{\alpha}{2}}$$

④



$$m\vec{g} + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 = 0$$

$$(X) \quad -T_1 \cos 60^\circ + T_2 = 0$$

$$(Y) \quad T_1 \sin 60^\circ - mg = 0$$

$$T_1 = \frac{2\sqrt{3}}{2} mg$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} mg$$

ПРИМЕРЫ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Полет реактивного истребителя



Движение поезда на магнитной подушке



§22. УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ ДЛЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Произвольное движение *абсолютно твердого тела (АТТ)* можно представить как результат сложения двух движений — поступательного и вращательного.

Вращательное движение АТТ — движение, при котором все точки тела в инерциальной системе отсчета движутся по окружностям, центры которых лежат на неподвижной прямой (оси вращения).

Примером вращательного движения может служить движение винтов вертолета, пропеллера вентилятора, CD-ROM в компьютере, карусели.

Выясним, при каких условиях возникает вращение тела вокруг жестко фиксированной оси ①. Если на ручку двери действует сила $\vec{F}_{\parallel}$ в направлении петель (оси вращения), дверь не открывается (не начинает вращаться вокруг оси). Сила $\vec{F}_{\perp}$, перпендикулярная направлению АО на ось вращения и самой вертикальной оси, приводит к вращению двери. Вращение тела относительно фиксированной оси может вызываться силой (или ее компонентой $\vec{F}_{\perp}$), перпендикулярной оси и отрезку, соединяющему точку приложения силы и ось вращения.

Определим условия, при которых вращательное движение отсутствует. Выполнение условия равновесия для поступательного движения

$$\sum \vec{F} = 0. \quad (1)$$

не означает отсутствия вращательного движения. Например, под действием пары сил, равных по величине и противоположно направленных, линейка вращается на поверхности стола ②.

Динамику вращательного движения характеризует

момент силы — физическая величина, равная произведению модуля силы на ее плечо ③:

$$M = Fl.$$

Плечо силы l — длина перпендикуляра, опущенного из оси вращения на линию действия силы.

Знак момента силы зависит от направления вращения тела. Момент считают положительным, если сила вращает тело относительно выбранной оси против часовой стрелки, и отрицательным, если по часовой стрелке. Момент силы, проходящей через ось, равен нулю ($l = 0$). Единица момента — *ньютон-метр* (Н·м).

Условие отсутствия вращательного движения:

Вращательное движение твердого тела в инерциальной системе отсчета не возникает, если алгебраическая сумма моментов (относительно произвольной оси O) всех сил, действующих на тело, равна нулю ④

$$\sum M_0 = 0. \quad (2)$$

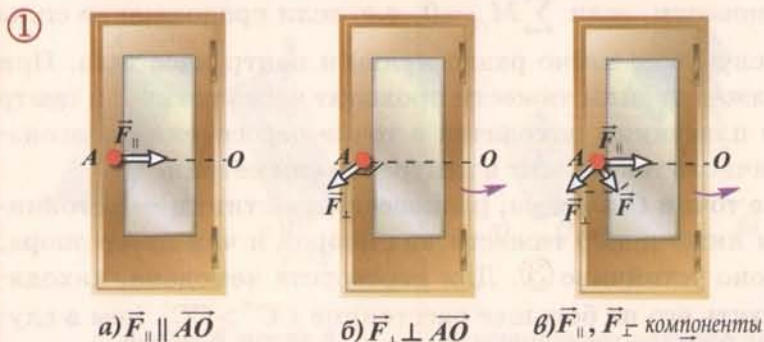
Для колеса радиусом r , на которое действуют силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, составляющие с радиальным направлением угол 60° и 90° соответственно, условие (2) можно представить в виде:

$$F_1 \cdot r \cdot \sin 60^\circ - F_2 \cdot r = 0.$$

Тело покоится в инерциальной системе отсчета, если отсутствует как его поступательное, так и вращательное движение, т.е. одновременно выполняются условия (1) и (2).

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Вращательное движение абсолютно твердого тела – движение, при котором все точки тела в инерциальной системе отсчета движутся по окружностям, центры которых лежат на неподвижной прямой (оси вращения)



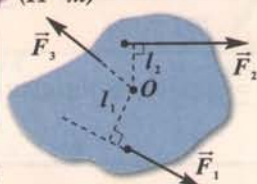
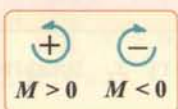
Вращение тела относительно фиксированной оси может вызываться силой (или ее компонентой $\vec{F}_{\perp}$), перпендикулярной оси и отрезку, соединяющему точку приложения силы и ось вращения



Возникновение вращательного движения при выполнении условия равновесия для поступательного движения ($\sum \vec{F} = 0$)

МОМЕНТ СИЛЫ

- ③ Момент силы – физическая величина, равная произведению модуля силы на ее плечо: $M = Fl$. Плечо силы – длина перпендикуляра, опущенного из оси вращения на линию действия силы. Единица момента – **ньютон-метр** (Н · м)



Моменты сил:

а) $M_0 = Fl$

б) $M_1 = F_1 l$

$M_2 = -F_2 l$

$M_3 = 0$ ($l_3 = 0$)

Момент считают положительным, если сила вращает тело относительно выбранной оси против часовой стрелки, и отрицательным, если по часовой стрелке

УСЛОВИЕ ОТСУТСТВИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

- ④ Вращательное движение твердого тела в инерциальной системе отсчета не возникает, если алгебраическая сумма моментов (относительно произвольной оси O) всех сил, действующих на тело, равна нулю



$\sum M_0 = 0$

$F_1 r \sin 60^\circ - F_2 r = 0$

ПРИМЕРЫ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Вращение винта вертолета



Вращение пропеллеров электростанции



§23. ЦЕНТР МАСС

Центр тяжести тела — точка приложения силы тяжести, действующей на тело.

Экспериментально центр тяжести можно найти при подвешивании тела ①. Подвешенное в точке A тело (пластинка) находится в равновесии, если $\sum M_A = 0$, т.е. если продолжение силы тяжести проходит через точку A (в этом случае ее плечо равно нулю) и центр масс тела. При подвешивании пластинки за угол B продолжение силы тяжести проходит через точку B и центр масс тела. Следовательно, центр тяжести пластинки находится в точке пересечения диагоналей. Центр тяжести однородного симметричного тела лежит в центре его симметрии.

Если центр тяжести C находится ниже точки O подвеса, равновесие пластинки — устойчивое, а если выше — неустойчивое ②. Чем ниже центр тяжести над опорой и чем шире опора, тем труднее перевернуть тело, тем более оно устойчиво ③. Для переворота чемодана, находящегося в положении b , требуется переместить его на большее расстояние $CC'' > CC'$, чем в случае a , и соответственно совершить большую работу.

Возможности экспериментального определения положения центра тяжести тел ограничены. Найдем теоретически центр тяжести несимметричной гантели — двух шаров массой m_1 и m_2 , соединенных невесомым стержнем ④. Гантеля будет находиться в равновесии, если под стержень под центром тяжести C подставить палец. Полная сила тяжести $(m_1 + m_2)\vec{g}$ приложена в точке C . Условие статического равновесия для вращательного движения гантели имеет вид:

$$\sum M = 0, \text{ или } m_1 g(x_C - x_1) + N \cdot 0 - m_2 g(x_2 - x_C) = 0.$$

Тогда координата центра тяжести

$$x_C = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}.$$

В однородном гравитационном поле ($g = \text{const}$), координату x_C называют координатой центра масс системы.

Координата центра масс — средняя координата системы тел.

Движение центра масс определяется только внешними силами, действующими на систему. Внутренние силы взаимодействия не влияют на положение центра масс.

В гравитационном поле центр масс системы движется по баллистической траектории ⑤. Покажем, что центр масс двухступенчатой баллистической ракеты после отделения головной части продолжает двигаться по той же баллистической траектории, что и до ее отделения. Предположим, что в верхней точке траектории от ракеты массой m , летящей со скоростью v_C ,

отстреливается первая ступень массой $\frac{m}{2}$ и падает на Землю. Головная часть ракеты равной массы продолжает баллистическое движение. Закон сохранения импульса имеет вид:

$$mv_C = \frac{m}{2}v_2.$$

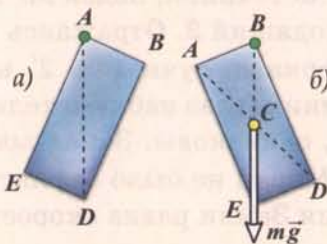
Следовательно, $v_2 = 2v_C$, т.е. головная ступень улетит по горизонтали на расстояние, вдвое большее, чем без отделения первой ступени. Центр масс ракеты будет находиться по оси X посередине между первой ступенью и головной частью.

Примерами сложного движения — поступательного движения центра масс и вращательного движения относительно центра масс — является движение гаечного ключа по плоской поверхности ⑥ и тела спортсмена при прыжке в воду ⑦.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ ТЕЛА –

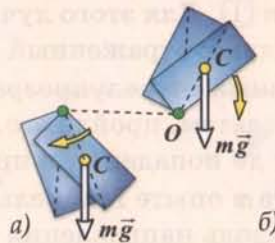
точка приложения силы тяжести, действующей на тело

- ① Определение центра тяжести при подвешивании тела



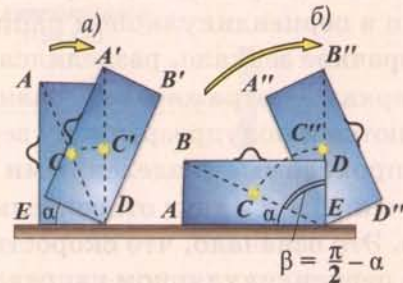
а) подвес в точке А
б) подвес в точке В

- ② Виды равновесия для вращательного движения



а) устойчивое равновесие
б) неустойчивое равновесие

- ③ Устойчивость тела в зависимости от положения центра тяжести

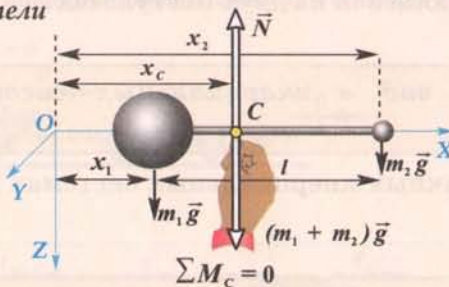


а) менее устойчивое равновесие
б) более устойчивое равновесие

ЦЕНТР МАСС СИСТЕМЫ –

точка, положение которой характеризует распределение массы системы в пространстве

- ④ Определение центра масс несимметричной гантели

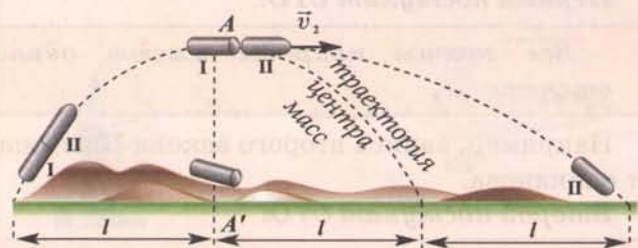


$$m_1 g (x_c - x_1) + N \cdot O - m_2 g (x_2 - x_c) = 0$$

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

Координата центра масс – средняя координата системы тел

- ⑤ Движение центра масс двухступенчатой баллистической ракеты



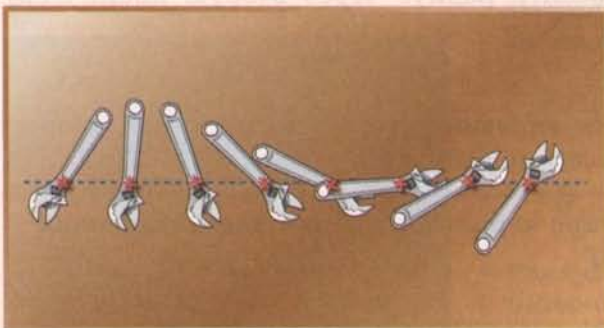
$$m v_c = \frac{m}{2} \cdot 0 + \frac{m}{2} v_2;$$

$$m x_c = \frac{m}{2} x_2 \quad (x_c = v_c t; x_2 = v_2 t)$$

$$x_c = \frac{x_2}{2}$$

ДВИЖЕНИЕ ЦЕНТРА МАСС ТЕЛА

- ⑥ Центр масс гаечного ключа движется по горизонтальному столу прямолинейно



СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА

- ⑦ Центр масс спортсмена движется по параболической траектории



§24. ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В опыте Майкельсона и Морли, поставленном в 1881 г., оценивалось влияние скорости движения Земли вокруг Солнца на скорость распространения света от источника, находящегося на Земле. Проводилось сравнение скорости света вдоль направления движения Земли (по оси Y) и в перпендикулярном направлении ①. Для этого луч света от источника, падая на полупрозрачное зеркало, разделялся на два луча: отраженный 1 и проходящий 2. Отражаясь от двух зеркал — отражателей, равноудаленных от полупрозрачного зеркала, лучи 1' и 2' направляются к полупрозрачному зеркалу, а затем, пройдя его, в приемник (глаз наблюдателя). Пути, проходимые разделенными лучами до попадания в приемник, одинаковы. Запаздывание лучей 1'' и 2'' друг относительно друга в опыте Майкельсона — Морли не было зафиксировано. Это означало, что скорость света вдоль направления движения Земли равна скорости света в перпендикулярном направлении.

Факт независимости скорости света от выбора системы отсчета оказался в противоречии с классическим законом сложения скоростей. Согласно этому закону скорость света вдоль направления скорости v движения Земли вокруг Солнца $v_{\uparrow} = c + v$, а в противоположном направлении $v_{\downarrow} = c - v$, т.е. $v_{\uparrow} \neq v_{\downarrow}$.

Расхождение теории с корректно поставленным экспериментом привело Альберта Эйнштейна к созданию *специальной теории относительности (СТО)*, или *релятивистской теории* (от англ. relativity — относительность), базирующейся на двух постулатах.

Первый постулат СТО:

Все законы природы имеют одинаковый вид в инерциальных системах отсчета ②.

Например, запись второго закона Ньютона в различных инерциальных системах (ИСО) будет одинакова.

Второй постулат СТО:

Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета ③.

Скорость света — максимально возможная скорость распространения любого взаимодействия, верхний предел скоростей для всех материальных тел.

Подтверждением наличия верхнего предела скорости является существование такого необычного астрономического объекта, как *черная дыра*, образующегося при гравитационном сжатии (коллапсе) массивной звезды. Если масса звезды более чем в 10 раз превосходит массу Солнца, ядро этой звезды, сжимаясь, достигает такой плотности, что даже свет не может вырваться из звезды, преодолев силы ее тяготения ④. Для оценки радиуса черной дыры ⑤ воспользуемся выражением для второй космической скорости (минимальной скорости, необходимой для преодоления гравитационного поля звезды массой M и радиусом R): $v_{II} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2GM/R}$. Соответственно можно выразить радиус через вторую космическую скорость:

$$R = \frac{2GM}{v_{II}^2}.$$

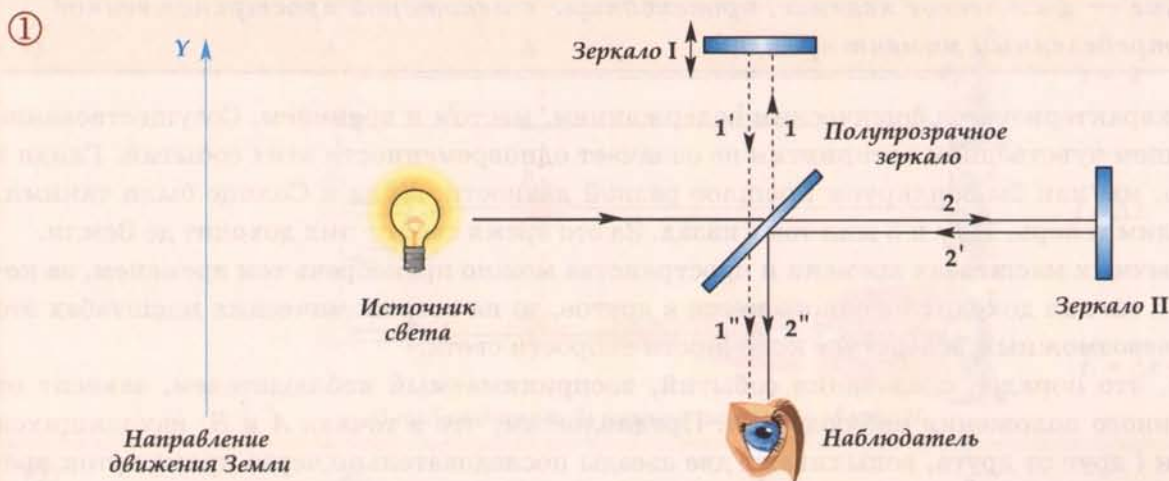
Согласно первому постулату СТО максимальное значение второй космической скорости $v_{II \max} = c$. Соответственно можно определить *критический радиус*.

Радиус Шварцшильда — критический радиус черной дыры, соответствующий скорости света:

$$R_{III} = \frac{2GM}{c^2}$$

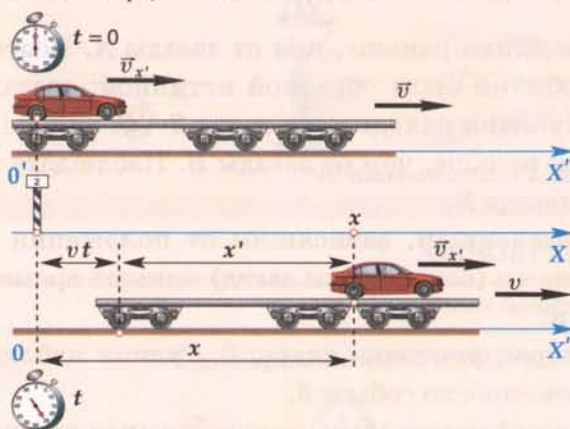
Даже свет не может выйти из черной дыры радиусом R_{III} ⑥.

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА – МОРЛИ



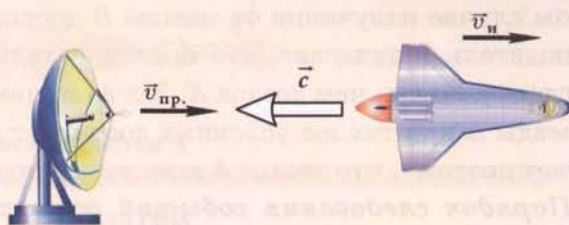
ПЕРВЫЙ ПОСТУЛАТ СТО

- ② Все законы природы имеют одинаковый вид в инерциальных системах отсчета



ВТОРОЙ ПОСТУЛАТ СТО

- ③ Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета



Скорость света – максимальная скорость распространения любого взаимодействия, не зависящая от скорости источника и приемника

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР

Излучение выходит с поверхности звезды радиусом, превосходящим радиус Шварцшильда ($R > R_m$)

Радиус Шварцшильда

Отсутствие излучения из черной дыры радиусом $R < R_m$ затрудняет получение информации о ее внутренней структуре



Вторая космическая скорость

$$v_{II} = \sqrt{2gR_m} = \sqrt{2\frac{GM}{R_m}} \leq c$$

$$R_m = \frac{2GM}{c^2}$$

Радиус Шварцшильда – критический радиус черной дыры



§25. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИ

Событие — физическое явление, происходящее в некоторой пространственной точке в определенный момент времени.

Событие характеризуется физическим содержанием, местом и временем. Сосуществование событий в нашем чувственном восприятии не означает одновременности этих событий. Глядя в звездное небо, мы как бы зондируем прошлое разной давности. Луна и Солнце были такими, как мы их видим теперь, 1,3 с и 8 мин тому назад. За это время свет от них доходит до Земли.

Если в обычных масштабах времени и пространства можно пренебречь тем временем, за которое световой сигнал доходит из одного места в другое, то на астрономических масштабах это оказывается невозможным вследствие конечности скорости света.

Покажем, что порядок следования событий, воспринимаемый наблюдателем, зависит от пространственного положения наблюдателя. Предположим, что в точках A и B , находящихся на расстоянии l друг от друга, вспыхивают две звезды последовательно через промежуток времени Δt (сначала в точке A , а затем в точке B). Приемник излучения находится в точке I на расстоянии L от звезды B ①.

В момент вспышки звезды B излучение от звезды A распространяется на расстояние $c\Delta t$. Если это расстояние меньше расстояния l между звездами, то интервал времени между вспышками меньше времени, необходимого для распространения света между звездами: $\Delta t < \frac{l}{c}$.

В этом случае излучение от звезды B достигнет приемника раньше, чем от звезды A . Поэтому наблюдатель I полагает, что последовательность событий была обратной истинной: звезда B зажглась раньше, чем звезда A . Когда приемник излучения находится в точке 2 ②, излучение от звезды A при тех же условиях достигнет приемник раньше, чем от звезды B . Наблюдатель 2 считает поэтому, что звезда A зажглась раньше, чем звезда B .

Порядок следования событий остается неопределенным, зависящим от положения наблюдателя, если промежуток времени между событиями (вспышками звезд) меньше времени, необходимого для распространения света между ними.

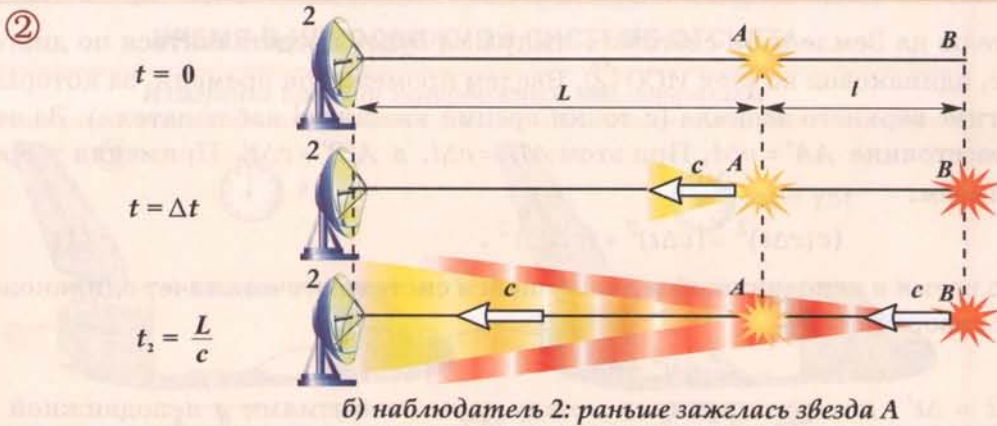
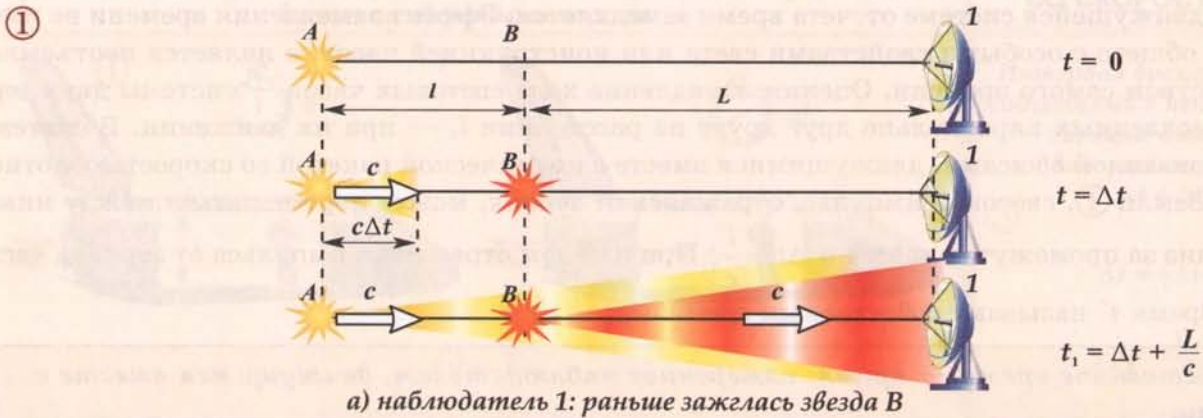
Одновременность событий — не абсолютная характеристика явлений. Разные наблюдатели могут иметь различные представления о одновременности событий.

Рассмотрим восприятие одного и того же события наблюдателями, находящимися в разных ИСО. Пусть световой сигнал излучается в центре ракеты, движущейся со скоростью v . Наблюдатель 1 внутри ракеты ③ считает, что свет достигает противоположных стен одновременно, так как стены находятся на одинаковом расстоянии от источника, а скорость света одинакова во всех направлениях. Внешний наблюдатель 2 ④ знает, что скорость света постоянна и не зависит от направления движения. Левая стена приближается к источнику со скоростью v , а правая удаляется от него с такой же скоростью. Поэтому, по его мнению, световой сигнал достигает левой стены раньше, чем правой. Это означает, что одновременность событий — относительна.

Два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчета, не являются одновременными в другой ИСО.

ПОРЯДОК СЛЕДОВАНИЯ СОБЫТИЙ

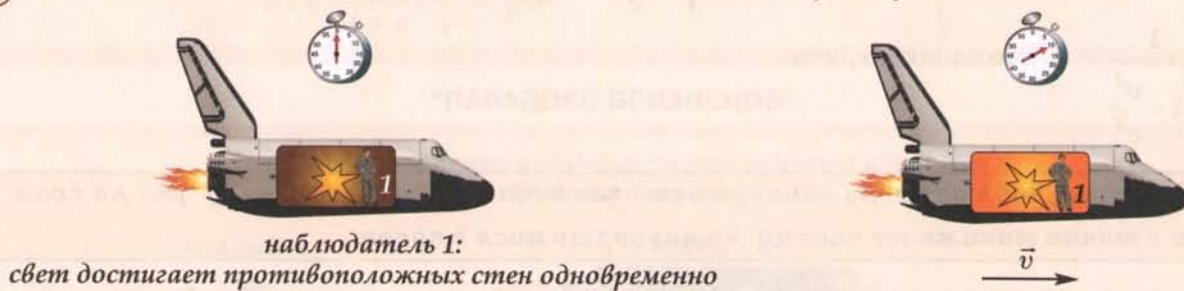
Зависимость порядка следования событий от положения наблюдателя



ОДНОВРЕМЕННОСТЬ СОБЫТИЙ

Относительность одновременности событий

③ Одновременность событий – не абсолютная характеристика явлений



④ Два события, одновременные в одном ИСО, не являются одновременными в другой ИСО



§26. ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Наблюдения световых явлений показывают, что движущиеся часы изменяют свой ритм, так как в движущейся системе отсчета время замедляется. Эффект замедления времени не имеет ничего общего с особыми свойствами света или конструкцией часов, а является неотъемлемым свойством самого времени. Оценим замедление хода световых часов — системы двух зеркал, установленных параллельно друг другу на расстоянии l , — при их движении. В системе отсчета, связанной с часами, движущимися вместе с космической ракетой со скоростью v относительно Земли ①, световой импульс, отражаясь от зеркал, может перемещаться между ними вверх и вниз за промежуток времени $\Delta t' = \frac{l}{c}$. При каждом отражении импульса от зеркала часы тикают. Время t' называют собственным временем.

Собственное время — время, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами.

Внешнему наблюдателю на Земле путь светового импульса будет представляться по диагонали AB' со скоростью c , одинаковой во всех ИСО ②. Введем промежуток времени, за который световой импульс достигнет верхнего зеркала (с точки зрения внешнего наблюдателя). За это время ракета пролетит расстояние $AA' = v\Delta t$. При этом $AB' = c\Delta t$, а $A'B' = c\Delta t'$. Применяя теорему Пифагора к $\triangle AB'A'$, имеем:

$$(c\Delta t)^2 = (v\Delta t)^2 + (c\Delta t')^2. \quad (1)$$

Предположение, что время в неподвижной и движущейся системе отсчета течет одинаково: $\Delta t = \Delta t'$, приводит к противоречию:

$$c^2 = v^2 + c^2.$$

Это означает, что $\Delta t \neq \Delta t'$: интервал времени между двумя событиями в неподвижной и движущейся СО различен. Из формулы (1) находим интервал времени по часам неподвижного наблюдателя:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t',$$

где $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > 1$. Это означает, что

неподвижный наблюдатель обнаруживает замедление хода часов в γ раз по сравнению с точно такими же часами, но находящимися в покое.

Существенное замедление времени возникает при скоростях движения v , близких к скорости света c ③. Тем не менее эффект замедления времени был экспериментально обнаружен и при скорости $v \ll c$. Отставание цезиевых часов, вернувшихся на Землю на реактивном самолете после полета вокруг Земли, от остававшихся в обсерватории на Земле, было зафиксировано в 1971 г. и составило 200 нс.

При движении замедляют свой ход не только движущиеся часы. Замедляются все физические процессы, в том числе и химические реакции в человеческом организме, поэтому течение жизни замедляется в соответствующее число раз ④. Соответственно замедляется и процесс старения космических путешественников. Неравноправие неинерциальных систем отсчета приводит к «парадоксу близнецов»: вернувшийся из космического путешествия близнец старее гораздо медленнее, чем его брат, остававшийся на Земле.

СОБСТВЕННОЕ ВРЕМЯ –

время, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами

Измерение собственного времени $\Delta t'$ наблюдателем, движущимся вместе со световыми часами



$$\Delta t' = \frac{l}{c}$$

ЗАМЕДЛЕНИЕ ХОДА ЧАСОВ, ДВИЖУЩИХСЯ СО СКОРОСТЬЮ v

Интервал времени между событиями в неподвижной системе отсчета и движущейся различен $\Delta t \neq \Delta t'$

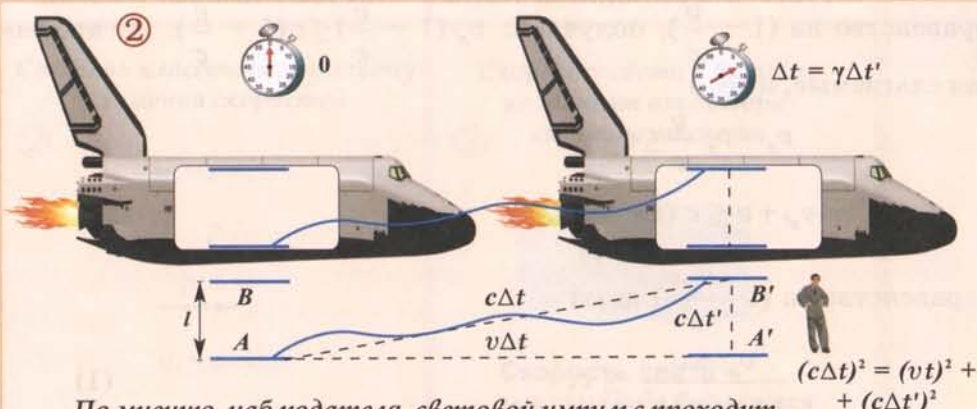
③

$$\Delta t = \gamma \Delta t',$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ВРЕМЯ В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЕТА

Измерение времени неподвижным наблюдателем



По мнению наблюдателя, световой импульс проходит большее расстояние за больший промежуток времени $\Delta t > \Delta t'$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t'$$

$$(c\Delta t)^2 = (vt)^2 + (c\Delta t')^2$$

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

Время в движущейся системе отсчета замедляется

“ПАРАДОКС БЛИЗНЕЦОВ”

Неравноправие неинерциальных систем отсчета приводит к “парадоксу близнецов”

④



Путешествующий близнец В стареет медленнее, чем близнец А, оставшийся на Земле, из-за замедления времени

§27. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

До опыта Майкельсона — Морли справедливость классического закона сложения скоростей не подвергалась сомнению ①. Согласно этому закону скорость света вдоль направления скорости v движения Земли вокруг Солнца $v_{\uparrow} = c + v$, а в противоположном направлении $v_{\downarrow} = c - v$, т.е. $v_{\uparrow} \neq v_{\downarrow}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме, излучаемого неподвижным источником ②. Опыт Майкельсона — Морли показал, что скорость света в вакууме постоянна и не зависит от выбора системы отсчета ③. Это означает, что

классический закон сложения скоростей неверен при скоростях, соизмеримых со скоростью света c .

При получении релятивистского закона сложения скоростей следует учесть, что материальное тело не может иметь скорость, большую скорости света ④. Поэтому скорость тела как относительно неподвижной системы отсчета X , так и относительно СО X' , движущейся со скоростью v , $v \leq c$; $v_{x'} \leq c$.

Умножая последнее неравенство на $(1 - \frac{v}{c})$, получаем: $v_{x'}(1 - \frac{v}{c}) \leq c(1 - \frac{v}{c})$. Раскрывая скобки и перегруппировывая слагаемые, имеем

$$v_{x'} - v_{x'} \frac{v}{c} \leq c - v,$$

или

$$v_{x'} + v \leq c(1 + \frac{v_{x'}v}{c^2}).$$

Деление обеих частей неравенства на $(1 + \frac{v_{x'}v}{c^2})$ дает:

$$\frac{v_{x'} + v}{1 + v_{x'}v/c^2} \leq c. \quad (1)$$

При малых скоростях, т.е. $v_{x'} \ll c$; $v \ll c$; $v_{x'}v/c^2 \ll 1$, неравенство (1) примет вид:

$$v_{x'} + v \leq c. \quad (2)$$

В левой части неравенства (2) фигурирует в соответствии с классическим законом сложения скоростей скорость v_x тела относительно неподвижной СО. Обобщая полученный результат на случай произвольных скоростей, можно предположить, что левая часть неравенства (2) также представляет скорость v_x . Следовательно, **релятивистский закон сложения скоростей** имеет вид:

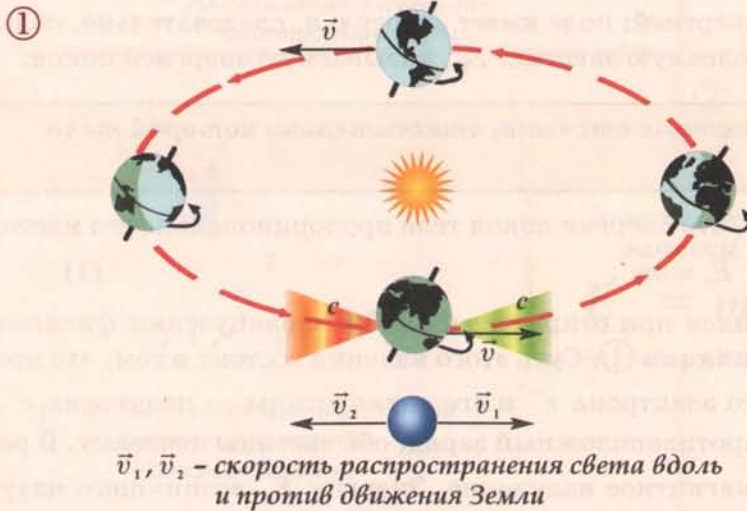
$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + v_{x'}v/c^2} \quad (3)$$

Воспользуемся релятивистским законом сложения скоростей для оценки скорости v_x (относительно неподвижной СО X , связанной с Землей) светового сигнала, излучаемого с космического корабля, удаляющегося от Земли со скоростью v ⑤. Скорость светового сигнала, излучаемого источником, покоящимся относительно корабля $v_{x'} = c$. Из формулы (3) следует, что

$$v_x = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c.$$

Стало быть, скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО и не зависит от скорости движения источника (или приемника).

СКОРОСТЬ СВЕТА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЗЕМЛИ ВОКРУГ СОЛНЦА



ВЫВОД РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЗАКОНА СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

④ Скорость v_x тела относительно неподвижной системы отсчета X

$$\begin{cases} v_x \leq c \\ v_{x'} \leq c \end{cases} \Downarrow v_{x'} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \leq c \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$\Downarrow v_{x'} + v \leq c \left(1 + \frac{v_{x'} v}{c^2}\right)$$

$$\Downarrow \frac{v_{x'} + v}{1 + \frac{v_{x'} v}{c^2}} \leq c \Downarrow$$

$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + \frac{v_{x'} v}{c^2}}$$

КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Согласно классическому закону сложения скоростей

②

$$v_1 = c + v$$

$$v_2 = c - v$$

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА-МОРЛИ

③ Скорость света в вакууме не зависит от выбора системы отсчета

$$v_1 = v_2 = c$$

Скорость света – максимально возможная скорость распространения любого взаимодействия

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО СИГНАЛА

⑤ Скорость распространения светового сигнала, излучаемого космическим кораблем

$$v_x = \frac{c + v}{1 + \frac{c v}{c^2}} = \frac{c \left(1 + \frac{v}{c}\right)}{1 + \frac{v}{c}} = c$$

Скорость света относительно Земли (неподвижная система отсчета) равна скорости света в вакууме

Скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО

§28. ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭНЕРГИИ И МАССЫ

Согласно теории относительности существует взаимосвязь между массой и энергией. Вещество имеет массу и поэтому уже обладает энергией; поле имеет энергию и, следовательно, обладает массой. Покоящееся тело имеет определенную энергию E_0 , называемую энергией покоя.

Энергия покоя — энергия тела в системе отсчета, относительно которой тело покоится.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн показал, что энергия покоя тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2. \quad (1)$$

Вывод Эйнштейна блестяще подтвердился при открытии в 1933 г. французским физиком **Фредериком Жолио-Кюри** явления **аннигиляции** ①. Суть этого явления состоит в том, что при взаимодействии отрицательно заряженного электрона e^- и его античастицы — позитрона e^+ , имеющих равную массу m_e и равный, но противоположный заряд, обе частицы исчезают. В результате аннигиляции возникает электромагнитное излучение. Энергия E_u возникшего излучения равняется сумме энергий покоя электрона и позитрона:

$$E_u = 2m_e c^2 = 2 \cdot (9,1 \cdot 10^{-31}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Уравнение аннигиляции может быть записано следующим образом:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma,$$

где γ — фотон, частица-переносчик электромагнитного взаимодействия и излучения.

Частицы могут как исчезать, так и рождаться ②.

Рождение электрон-позитронной пары — процесс, обратный аннигиляции. Французские физики **Фредерик Жолио-Кюри** и **Ирен Кюри** в 1933 г. обнаружили, что электрон-позитронная пара может возникнуть при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

Для рождения пары электромагнитное поле должно обладать достаточной минимальной энергией, равной сумме энергий покоя частиц:

$$E_{\min} = 2E_0 = 2m_e c^2.$$

При наличии такой энергии возможно рождение электрона и позитрона в состоянии покоя.

При излучении света энергия системы уменьшается: $E < 0$. Это означает, что масса системы (в соответствии с формулой (1)) уменьшается на величину

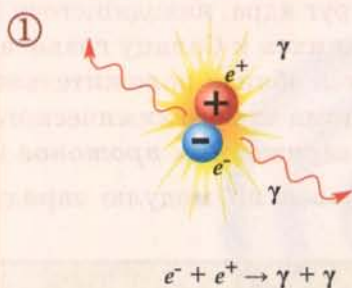
$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} < 0.$$

Подобное уменьшение массы системы происходит, например, при образовании атома дейтерия из протона, нейтрона и электрона. Энергия выделяется как при образовании ядра дейтерия ③, так и при возникновении атома из ядра и электрона ④.

Излучение Солнца и звезд несет энергию и, значит, массу ⑤. Излучая энергию, Солнце и звезды теряют массу. Из-за излучения масса Солнца уменьшается примерно на 4 млн тонн в секунду. Гравитационное притяжение к Солнцу излучения, идущего от далекой звезды, искривляет ход светового луча ⑥. Во время солнечного затмения можно наблюдать эту звезду, невидимую в обычных условиях.

ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЕ ВЕЩЕСТВА И ПОЛЯ

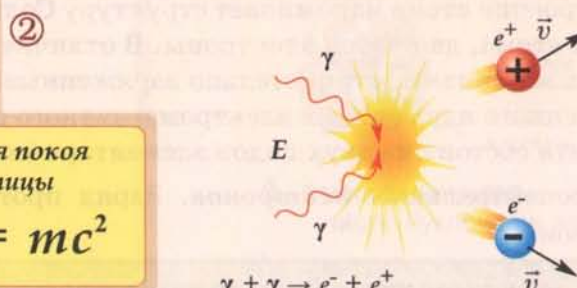
Аннигиляция электрон-позитронной пары



$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

γ – фотон (частица - переносчик электромагнитного взаимодействия)

Рождение электрон-позитронной пары



$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$$

$$E \geq 2m_e c^2$$

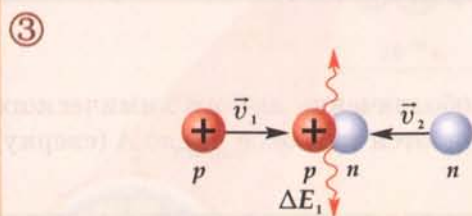
$$E_0 = mc^2$$

Энергия покоя частицы

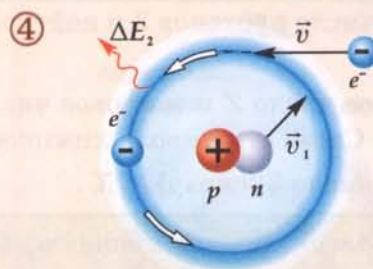
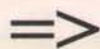
$$E_0 = mc^2$$

ДЕФЕКТ МАССЫ

Образование атома дейтерия из протона, нейтрона и электрона



При образовании ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ выделяется энергия ΔE_1



При образовании атома дейтерия ${}^2_1\text{H}$ свободный электрон захватывается ядром, излучается энергия $\Delta E_2 \ll \Delta E_1$

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Мощность излучения Солнца составляет $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт



Из-за излучения масса Солнца уменьшается примерно на 4 млн. т в секунду

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ

Солнце как гравитационная линза



Искривление светового луча, идущего от звезды S к Земле, вследствие гравитационного притяжения фотонов к Солнцу; S' – кажущееся положение звезды



Вид Солнца с Земли во время солнечного затмения, при котором устраняется прямая засветка приемника

§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 $(-e/3)$.

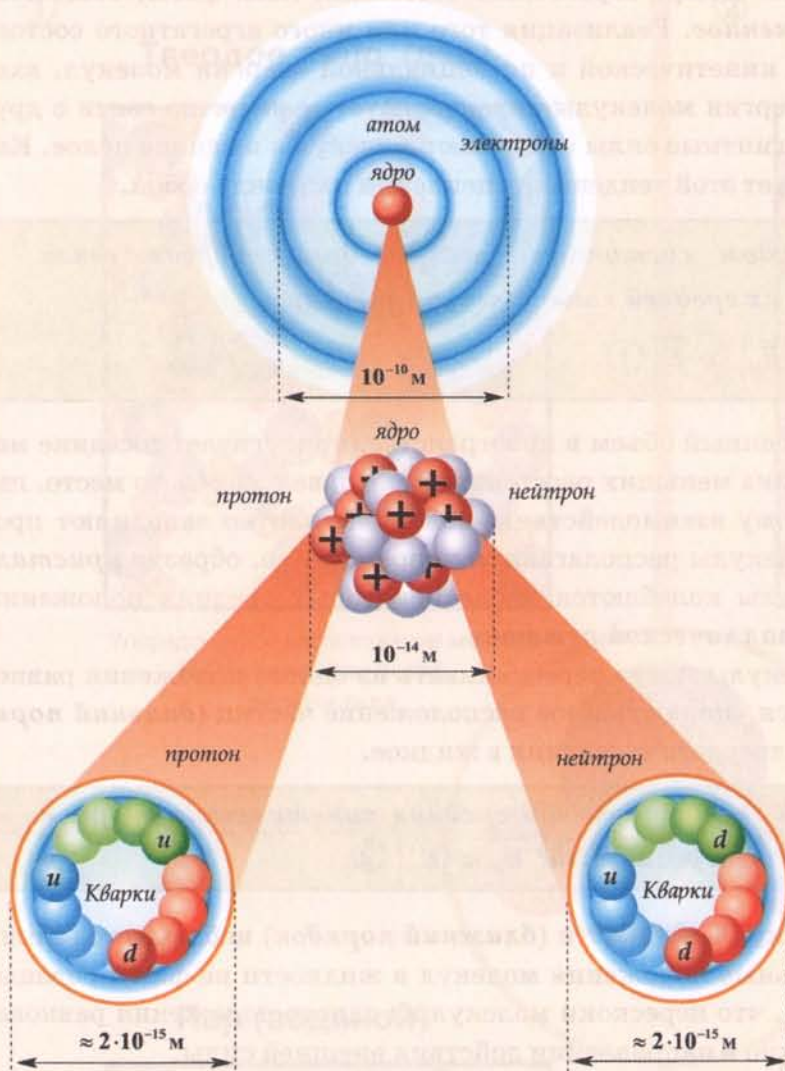
Число нейтронов в ядре ($N = A - Z$) одного и того же элемента ($Z = \text{const}$) может быть различным.

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: $Z = 3$, $N = 6 - 3 = 3$.

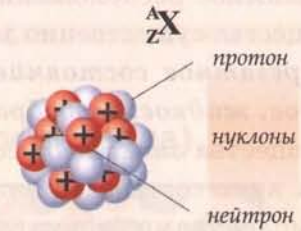
СТРУКТУРА АТОМА

①



ЯДРО АТОМА

②



A – массовое число –
число нуклонов в ядре

N – число нуклонов в ядре

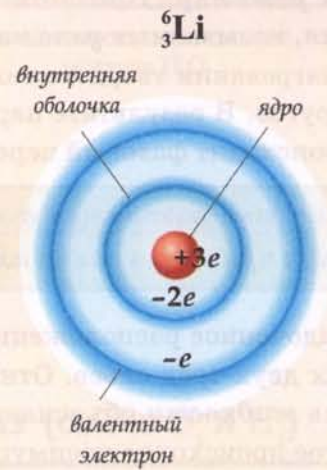
Z – зарядовое число –
число протонов в ядре

$$A = Z + N$$

ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ АТОМА

③

Атом лития



$$Z = 3$$

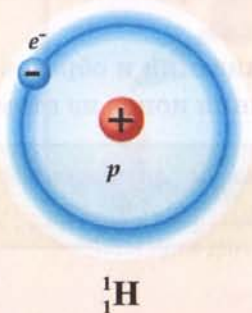
$$N = 3$$

$$A = Z + N = 6$$

ИЗОТОПЫ АТОМА ВОДОРОДА

④

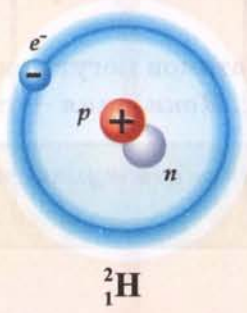
Протий



${}^1_1\text{H}$

⑤

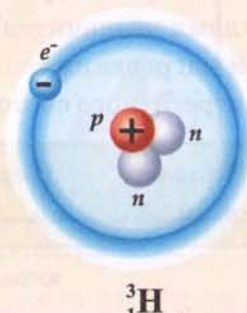
Дейтерий



${}^2_1\text{H}$

⑥

Тритий



${}^3_1\text{H}$

§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 твердого тела молекулы могут перескакивать из одного положения равновесия в другое. В результате нарушается упорядоченное расположение частиц (*дальний порядок*) — происходит фазовый переход из твердого 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.

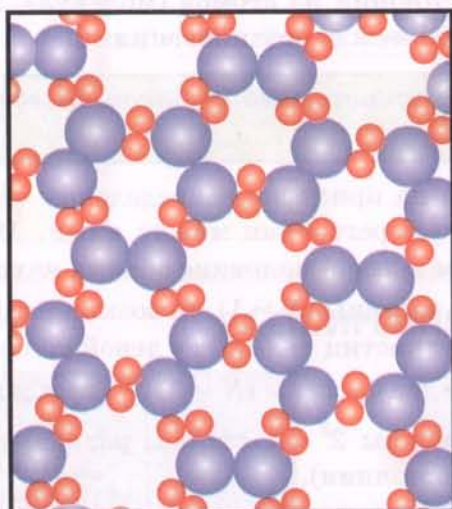
При нагревании газа столкновения атомов могут приводить к их ионизации и образованию нового агрегатного состояния — плазмы. *Ионизация* — процесс образования ионов из атомов.

Плазма — электронейтральная совокупность нейтральных и заряженных частиц.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ

①

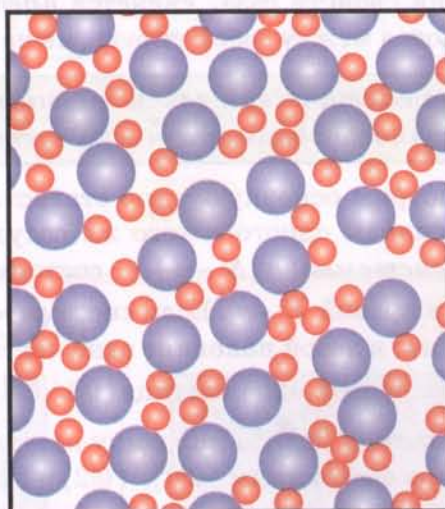
Твердое тело (лед)



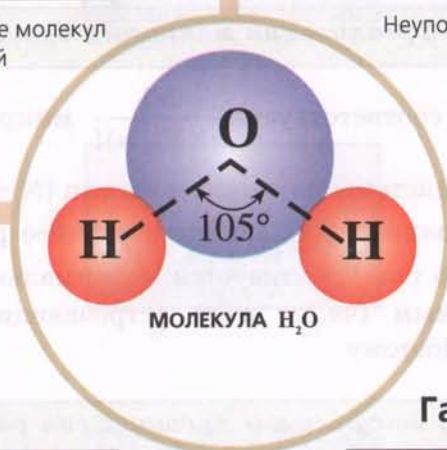
Упорядоченное расположение молекул H_2O в кристаллической решетке льда

②

Жидкость (вода)

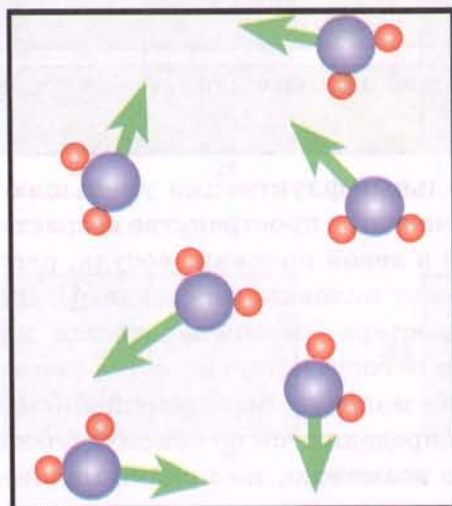


Неупорядоченное расположение молекул H_2O



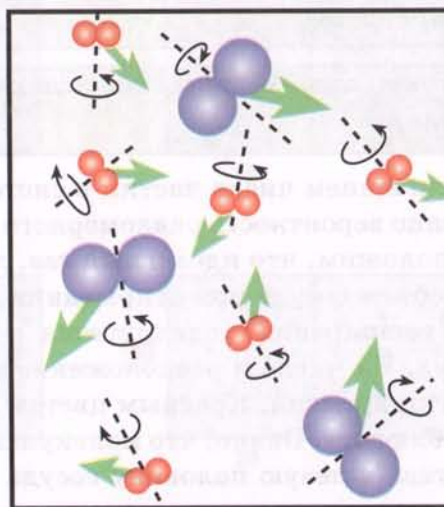
③

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

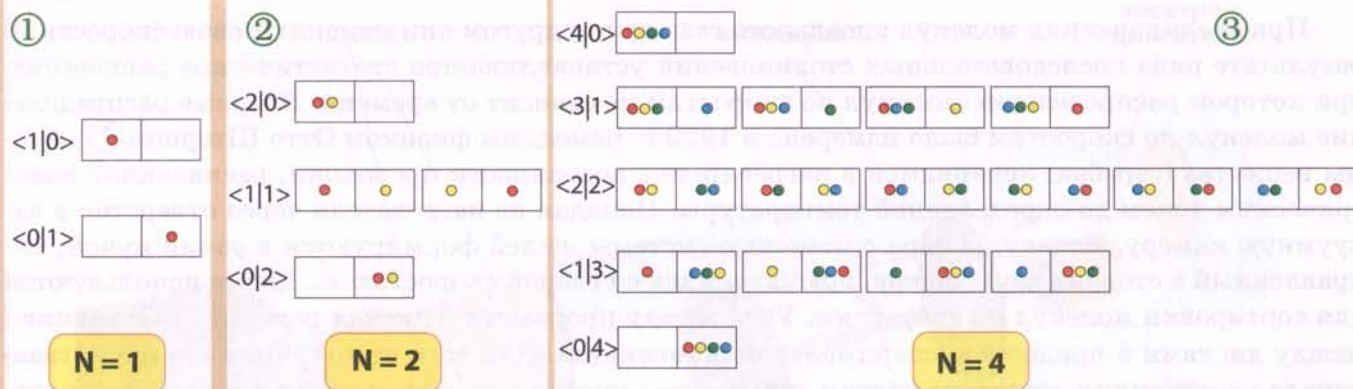
молекулы идеального газа в отсутствие внешних сил равномерно распределены в пространстве.

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.

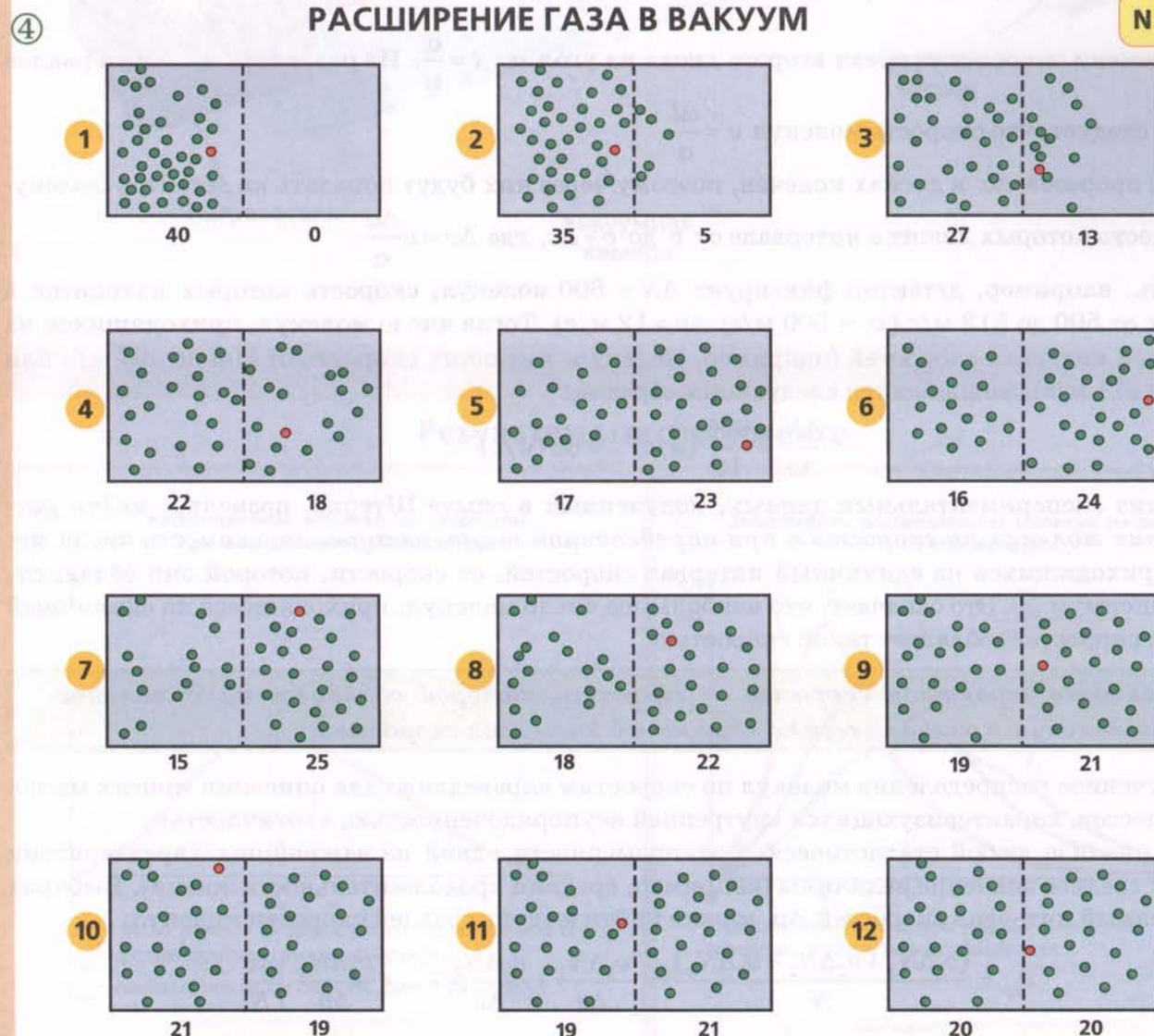
Предположим, что идеальный газ, локализованный в левой половине сосуда, расширяется в весь объем сосуда при открывании перегородки между половинами сосуда ④. Динамика процесса расширения моделируется с помощью компьютера, рассчитывающего движение 40 молекул. Их число и расположение в каждой половине 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:

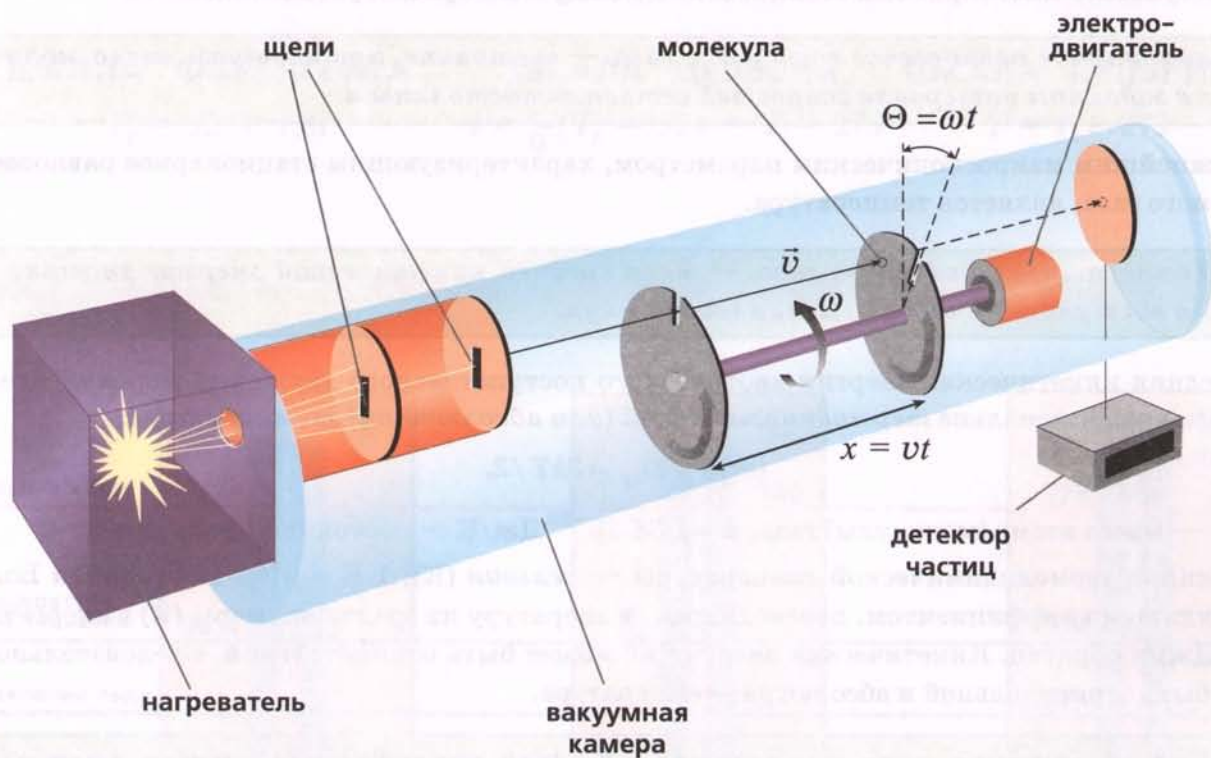
$$v_{\text{ср}} = \frac{(v_1 \Delta N_1 + v_2 \Delta N_2 + v_k \Delta N_k)}{N} = \left(\frac{v_1 \Delta N_1}{\Delta v} + \frac{v_2 \Delta N_2}{\Delta v} + \dots + \frac{v_k \Delta N_k}{\Delta v} \right) \frac{\Delta v}{N}$$

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

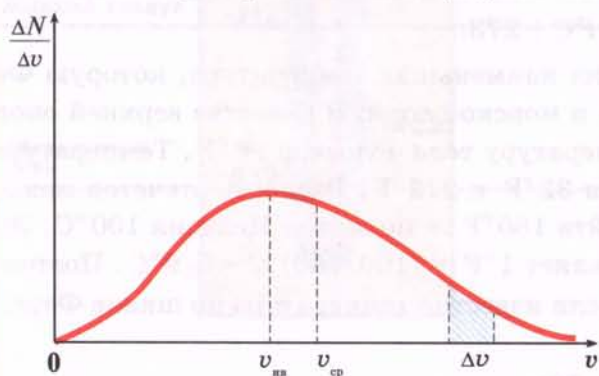
ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО СКОРОСТЯМ



Результаты эксперимента

②

Распределение молекул по скоростям при определенной температуре

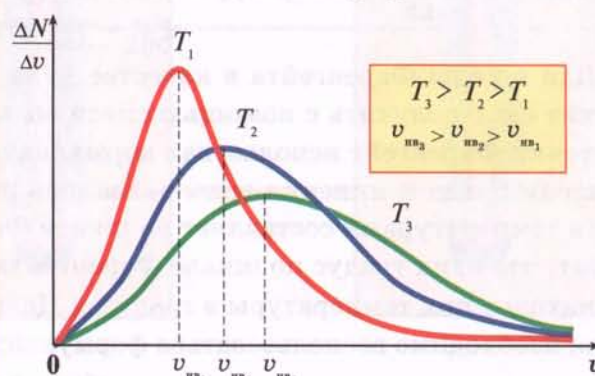


ΔN – число молекул со скоростью в интервале от v до $v + \Delta v$
 $v_{ср}$ – средняя скорость движения молекул
 $v_{нв}$ – наиболее вероятная скорость движения молекул

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

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

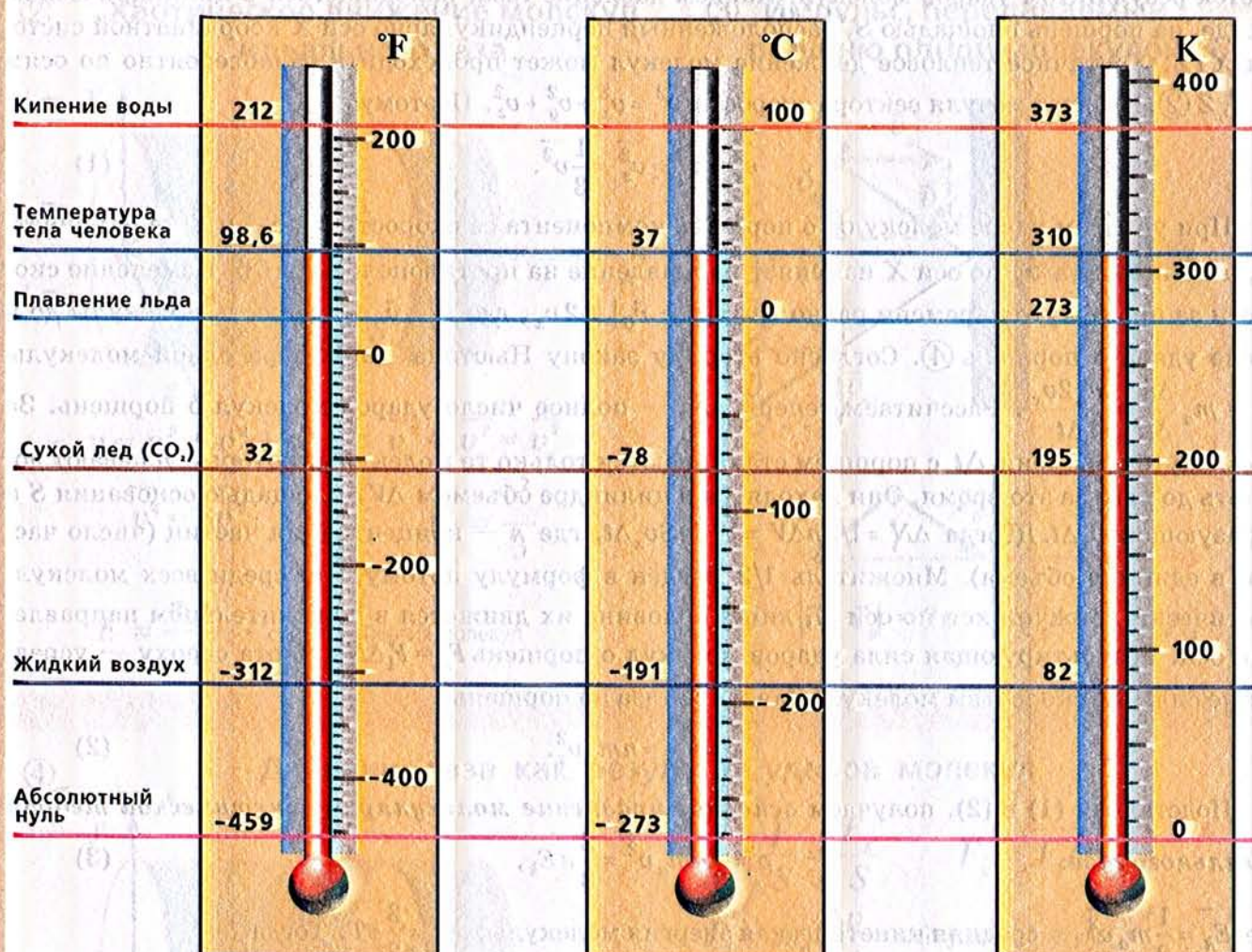
$$T_F = 32 + 1,8t$$

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

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

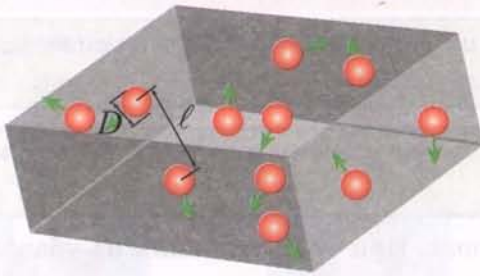
Учитывая, что $n = \frac{N}{V}$, $N = \frac{m}{m_a}$, $m_a = \frac{M}{N_a}$, $N_A = \frac{R}{k}$, получаем

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



$$D \ll \ell$$

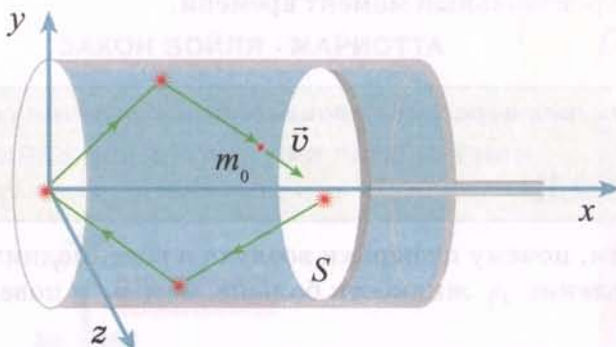
диаметр молекул много меньше
среднего расстояния между частицами

$$E_k \gg E_p$$

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



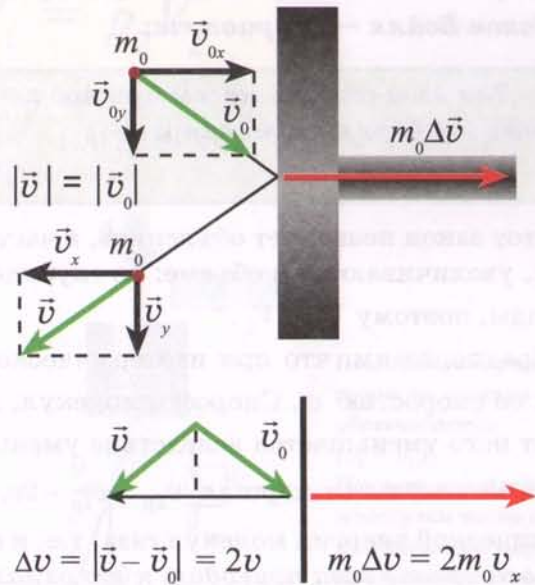
$$v = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

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

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

③

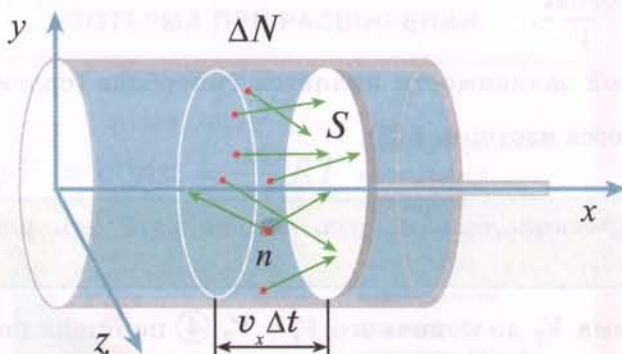
Импульс, передаваемый поршню одной молекулой



$$\Delta v = |\vec{v} - \vec{v}_0| = 2v \quad m_0 \Delta v = 2m_0 v_x$$

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.

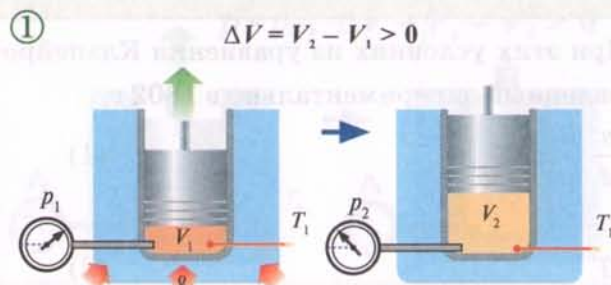
Изотерма — график изменения макроскопических параметров газа при изотермическом процессе.

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.

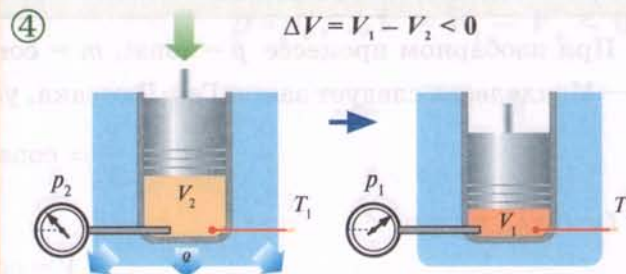
ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

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

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА ($Q > 0$)



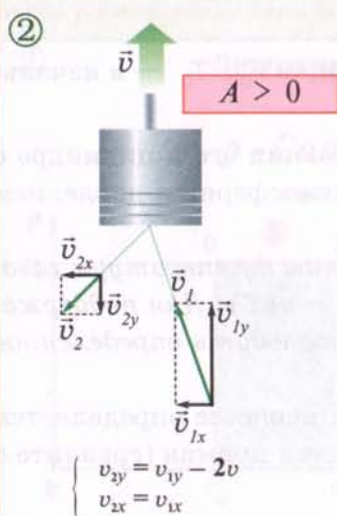
СЖАТИЕ ГАЗА ($Q < 0$)



ЗАКОН БОЙЛЯ - МАРИОТТА

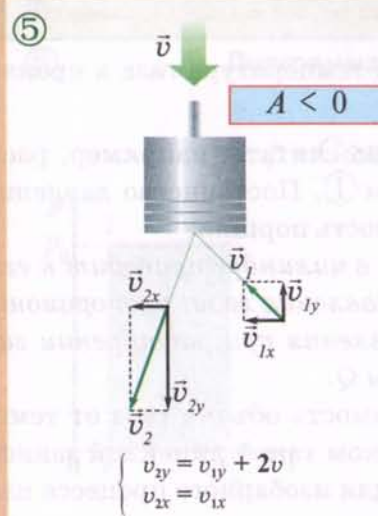
$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ПРИ РАСШИРЕНИИ



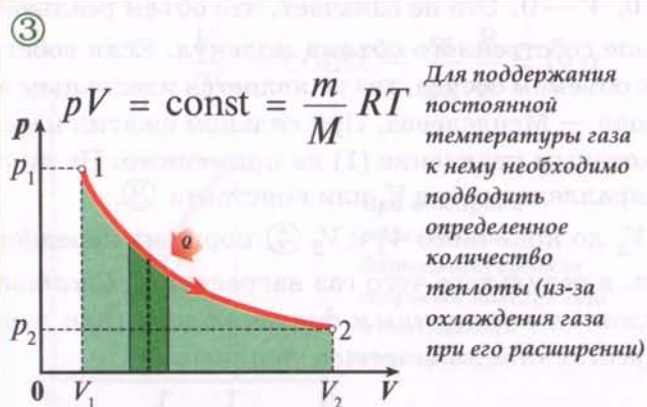
Скорость молекул, догоняющих поршень, уменьшается после удара ($v_2 < v_1$). Это приводит к уменьшению средней кинетической энергии молекул газа, т.е. к его охлаждению

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА ПРИ СЖАТИИ

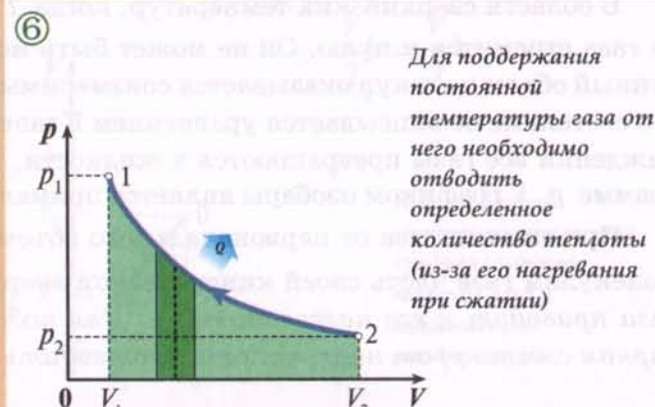


После удара поршня скорость молекул увеличивается ($v_2 > v_1$). Поршень передает молекулам часть своей кинетической энергии, в результате чего газ нагревается

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.

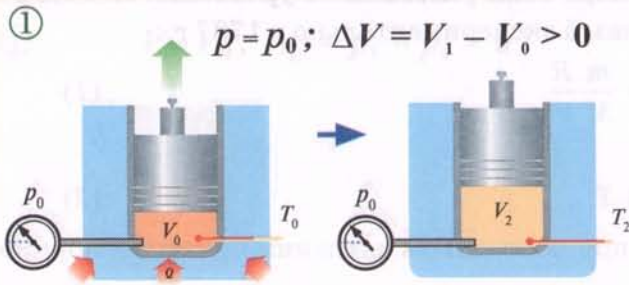
В области сверхнизких температур, когда $T \rightarrow 0$, $V \rightarrow 0$. Это не означает, что объем реального газа стремится к нулю. Он не может быть меньше собственного объема молекул. Если собственный объем молекул оказывается соизмеримым с объемом сосуда, газ не является идеальным и его состояние 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.

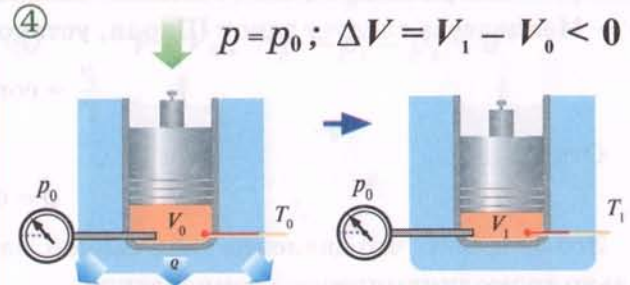
ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

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

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА ($Q > 0$)



СЖАТИЕ ГАЗА ($Q < 0$)



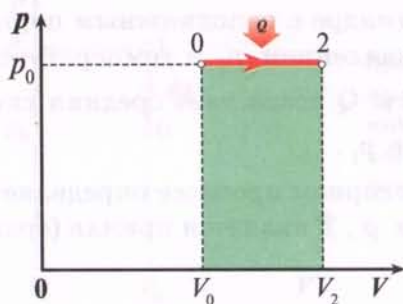
ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА

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

ИЗОБАРА ПРИ РАСШИРЕНИИ

② Диаграмма (p, T)

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

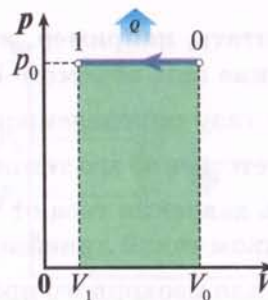


При изобарном расширении к газу подводится количество теплоты Q

ИЗОБАРА ГАЗА ПРИ СЖАТИИ

⑤ Диаграмма (p, T)

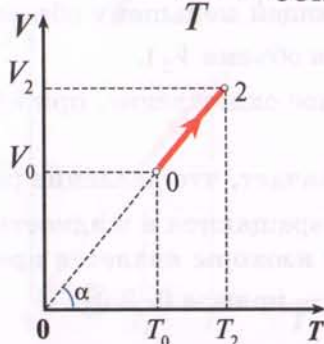
$$p = \text{Const} = p_0$$



При изобарном сжатии от газа отводится количество теплоты Q

③ Диаграмма (V, T)

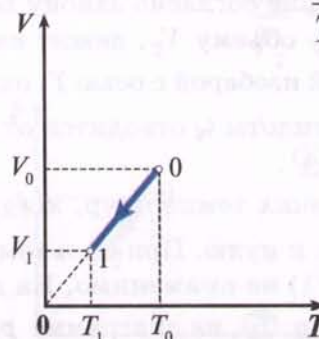
$$\frac{V}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \frac{R}{p} = \text{tg } \alpha$$



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.:

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

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

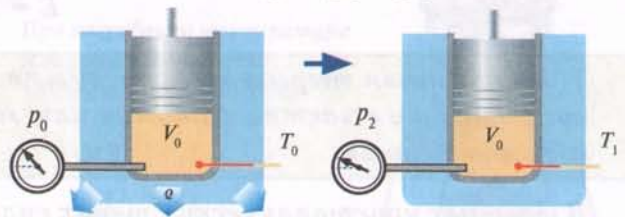
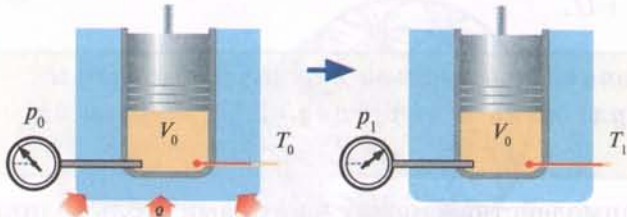
($V = \text{const}$, $m = \text{const}$)

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА ($Q > 0$)

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ($Q < 0$)

① $V = V_0$; $\Delta p = p_1 - p_0 > 0$

④ $V = V_0$; $\Delta p = p_1 - p_0 < 0$



ЗАКОН ШАРЛЯ

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

ИЗОХОРА ПРИ РАСШИРЕНИИ

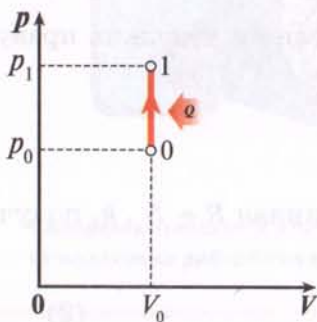
ИЗОХОРА ГАЗА ПРИ СЖАТИИ

② Диаграмма (p, V)

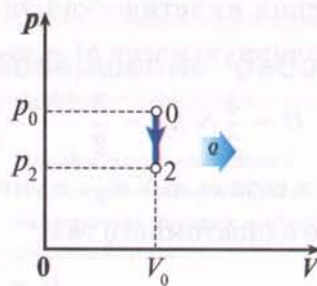
⑤ Диаграмма (p, V)

$V = \text{Const} = V_0$

$V = \text{Const} = V_0$



При изохорном нагревании к газу подводится количество теплоты Q



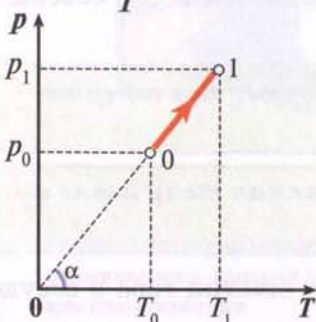
При изохорном охлаждении от газа отводится количество теплоты Q

③ Диаграмма (p, T)

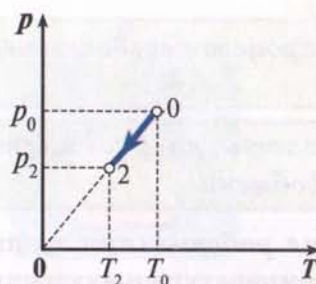
⑥ Диаграмма (p, T)

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

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



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.

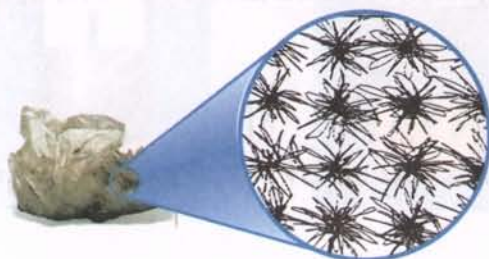
Количество теплоты, получаемое телом, — энергия, передаваемая телу извне в результате теплообмена.

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

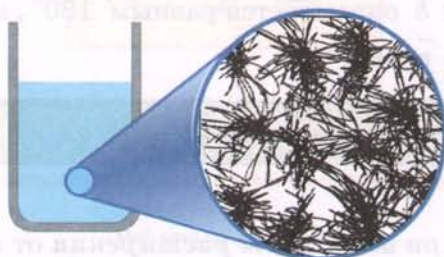
①



Частицы колеблются около положений равновесия, взаимодействуя с ближайшими частицами

Жидкость

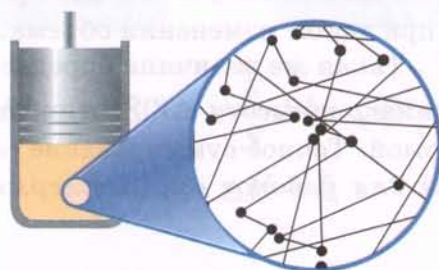
②



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.

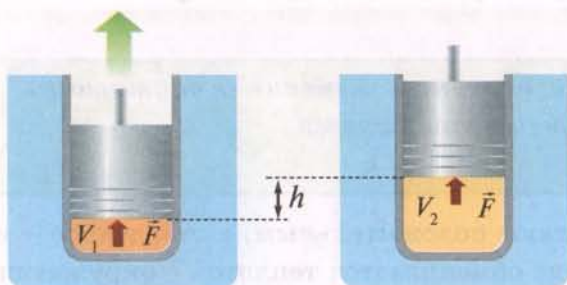
Найдем работу газа при изопроцессах. **Работа газа при изобарном расширении** от начального объема V_1 до конечного V_2 равна площади прямоугольника под изобарой со сторонами p и $(V_2 - V_1)$ ③. **Работа газа при изохорном процессе не совершается:** $A = 0$ ④.

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



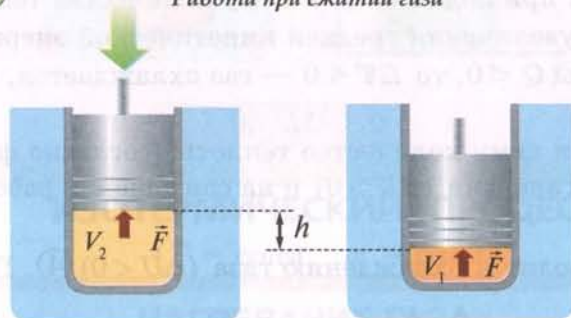
$$A = Fh \cos 0^\circ = \frac{F}{S} Sh = p(V_2 - V_1)$$

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

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

СЖАТИЕ ГАЗА ($A < 0$)

② Работа при сжатии газа



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

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

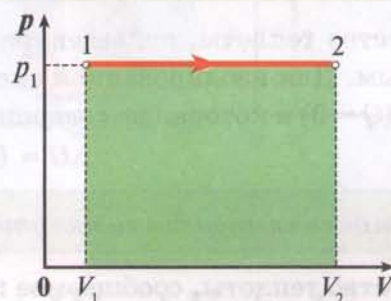
$$A = \bar{p} \Delta V < 0$$

РАБОТА ГАЗА ПРИ ИЗОПРОЦЕССАХ

Изобарный процесс

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

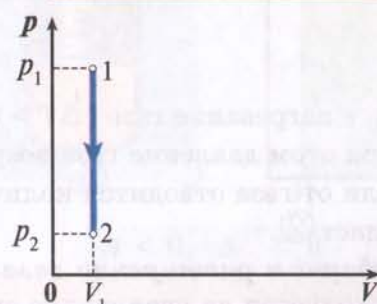
$$A = p(V_2 - V_1)$$



Изохорный процесс

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

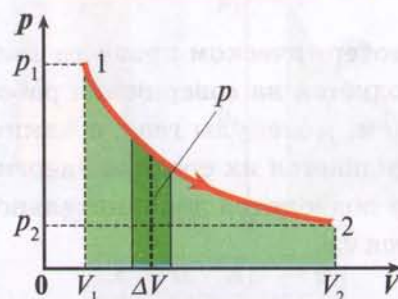
$$A = 0$$



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:

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

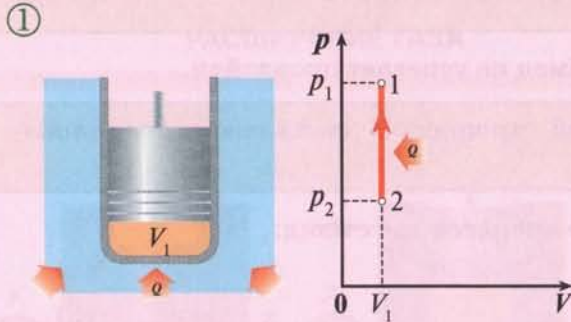
При изотермическом процессе количество теплоты, переданное газу от нагревателя, полностью расходуется на совершение работы ⑤. При расширении газа, находящегося в цилиндре под поршнем, молекулы газа, сталкиваясь с поршнем, уменьшают свою скорость и соответственно уменьшается их средняя энергия. Поэтому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

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС

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

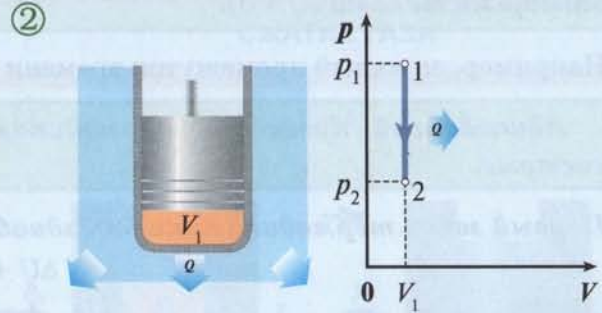
$$Q = \Delta U$$

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА



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

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА



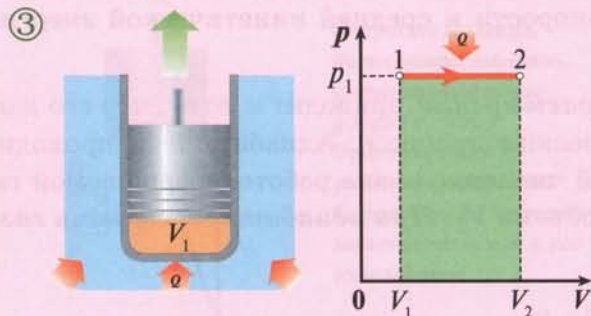
$$A = 0, \Delta U < 0$$

ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

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

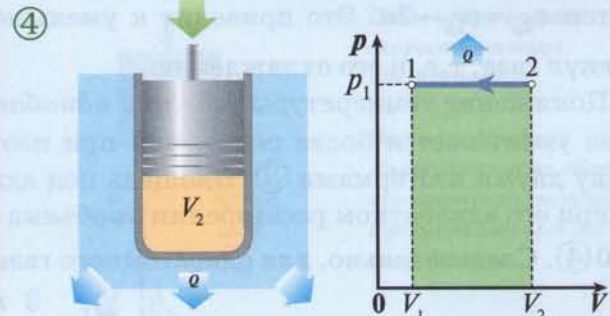
$$Q = \Delta U + A$$

НАГРЕВАНИЕ ГАЗА



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

ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА



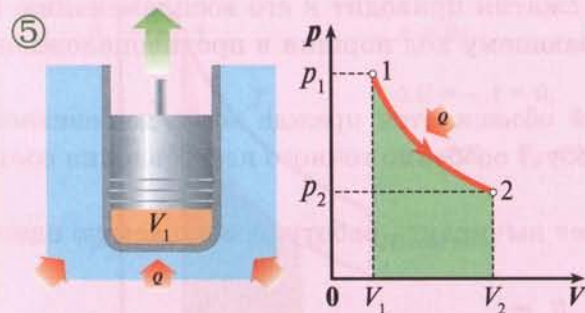
$$A < 0, \Delta U < 0$$

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

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

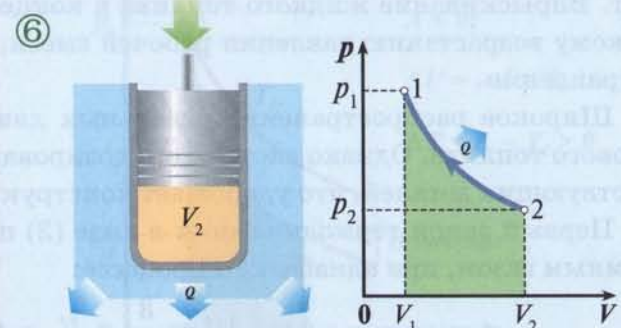
$$Q = A$$

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.

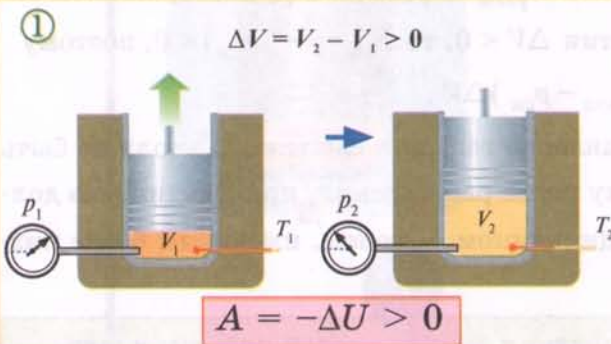
Первый закон термодинамики в виде (2) позволяет вычислить работу, совершаемую одноатомным газом, при адиабатном процессе:

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

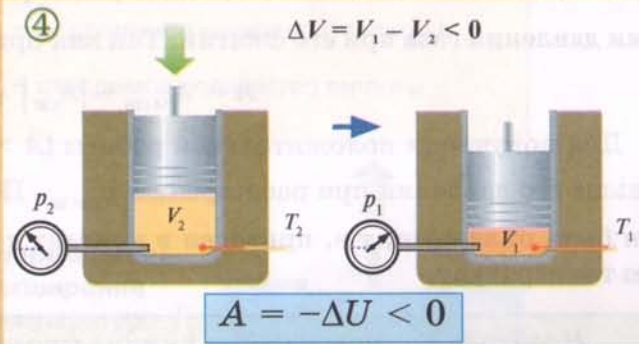
ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННАЯ СИСТЕМА

$$Q = 0$$

РАСШИРЕНИЕ ГАЗА



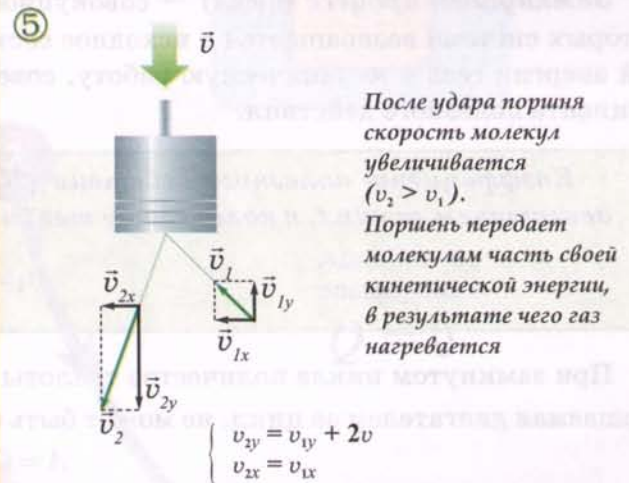
СЖАТИЕ ГАЗА



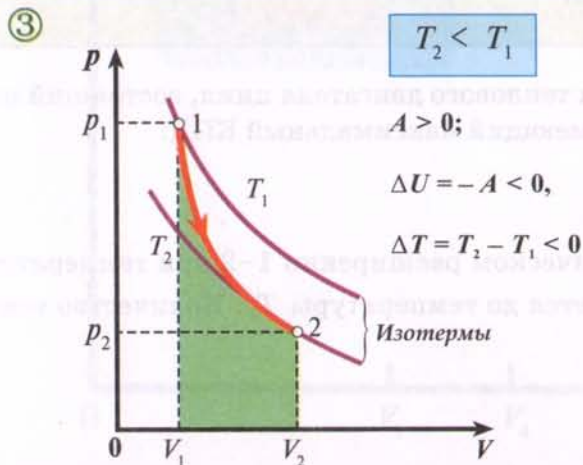
ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ПРИ РАСШИРЕНИИ



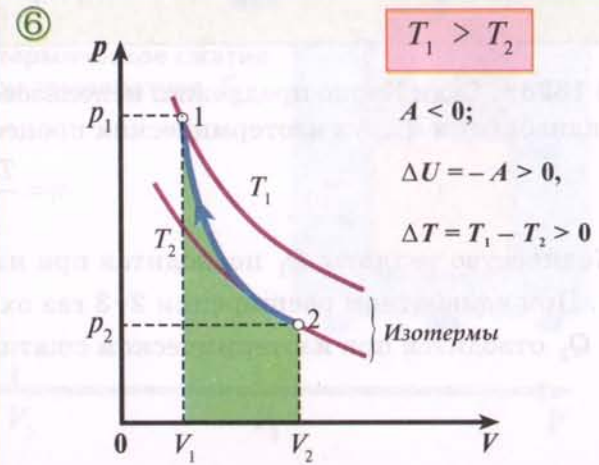
НАГРЕВАНИЕ ГАЗА ПРИ СЖАТИИ



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

$$A = Q_1 - Q_2.$$

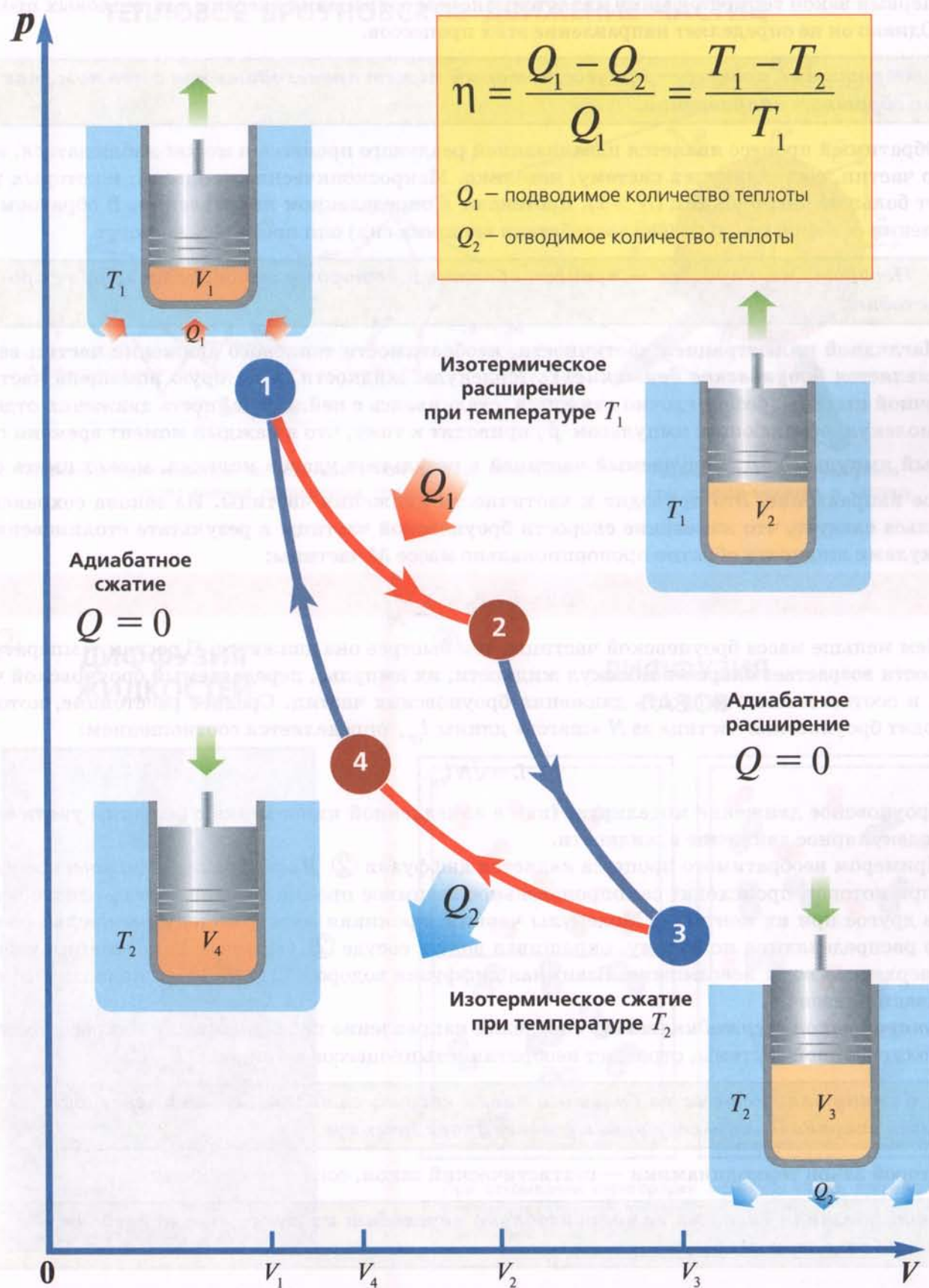
КПД теплового двигателя всегда меньше единицы:

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

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:

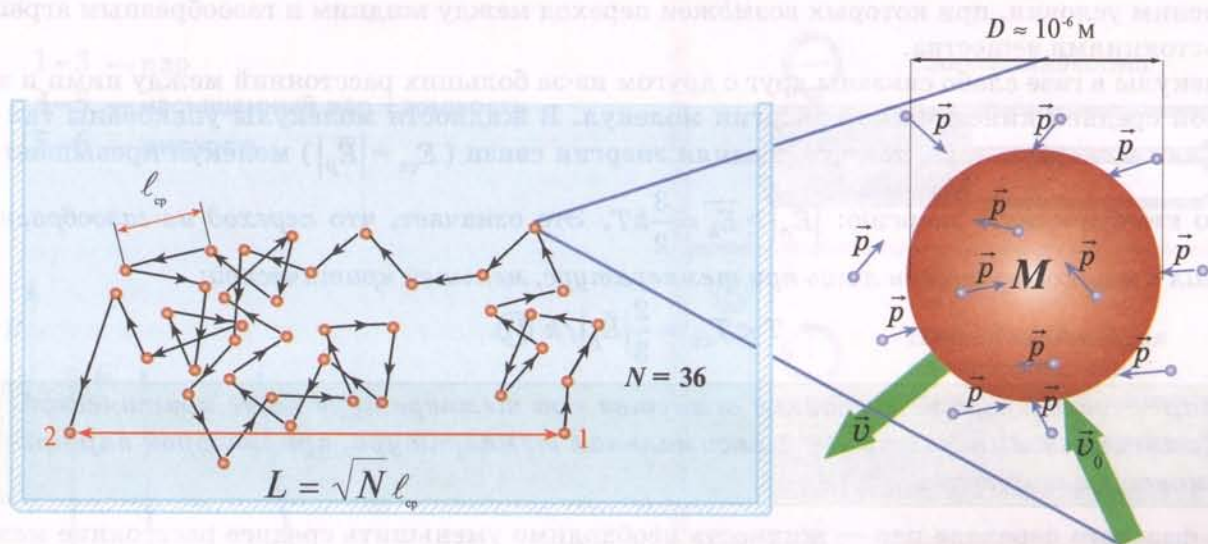
Замкнутая система из большого числа частиц самопроизвольно переходит из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное.

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

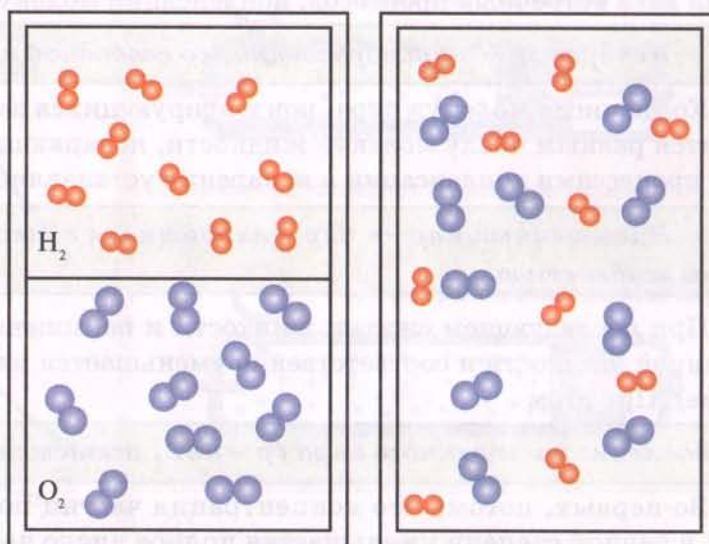
②

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.

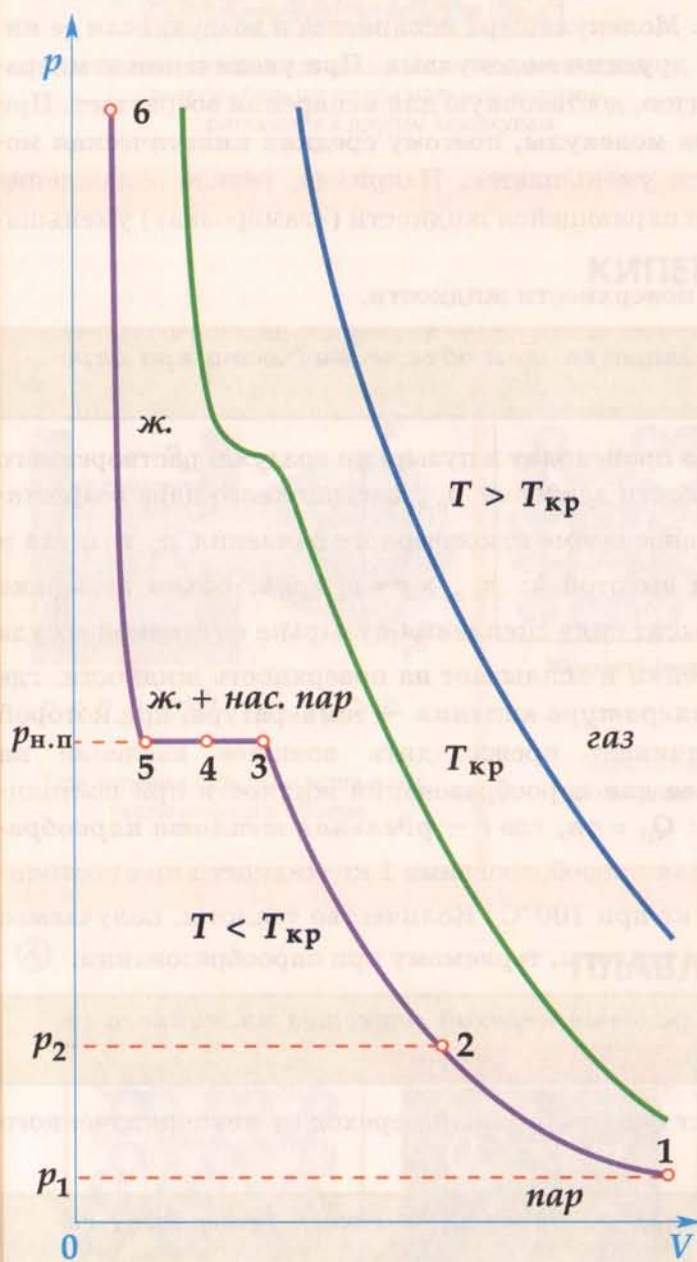
ИЗОТЕРМА СЖИЖЕНИЯ ПАРА

И

1-3 — пар

3-5 — насыщенный пар + жидкость

5-6 — жидкость



ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ПАРА

⑥



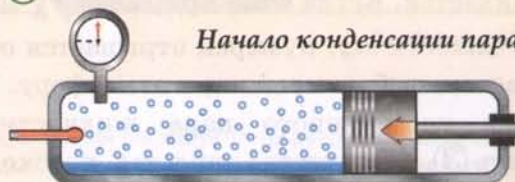
⑤



④



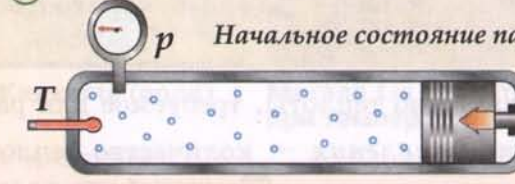
③



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.

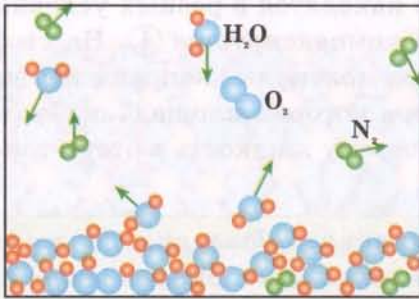
При кристаллизации жидкости происходит скачкообразный переход от неупорядоченного расположения частиц к упорядоченному.

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

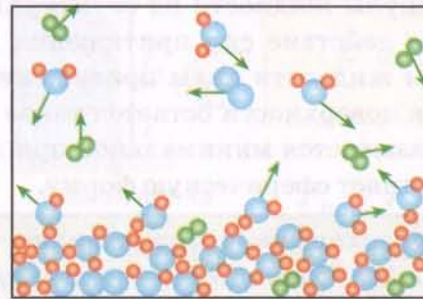
Количество теплоты, требуемое для расплавления массы m , $Q_{пл} = \lambda m$, где λ — **удельная теплота плавления** — количество теплоты, необходимое для плавления 1 кг вещества при температуре плавления ⑤.

①

ИСПАРЕНИЕ



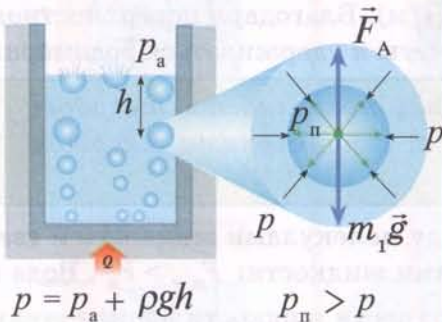
Молекула воды испаряется, если ее кинетическая энергия больше потенциальной энергии притяжения к другим молекулам



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

КИПЕНИЕ

②



При кипении пузырьки всплывают, увеличиваясь в объеме

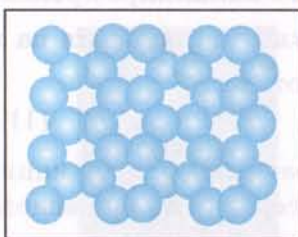
③



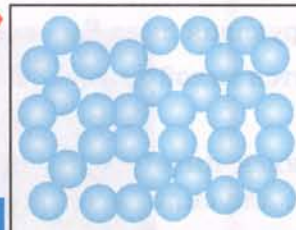
Теплота парообразования расходуется на разрыв связей между молекулами жидкости. Температура жидкости во время кипения остается постоянной

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:

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

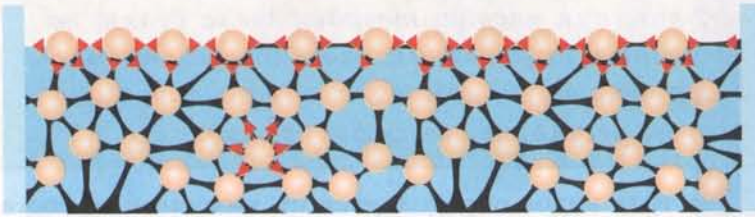
Откуда высота подъема жидкости в капилляре

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

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

СТРУКТУРА ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ

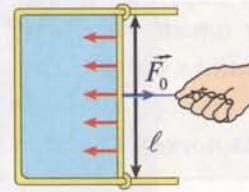
①



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

СИЛА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

②



Мыльная пленка

$$F = \sigma \ell$$

$$F_0 = F_1 + F_2$$

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

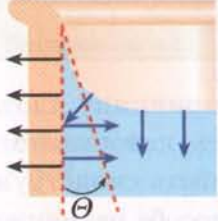
$$F_0 = 2\sigma \ell$$



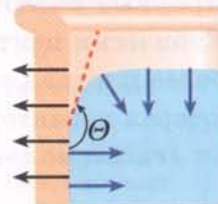
Вид сверху

СМАЧИВАНИЕ

③



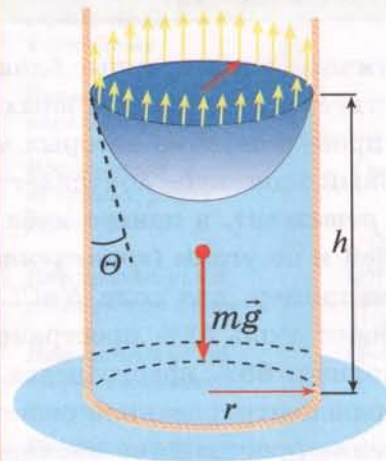
Смачивающая жидкость
($\theta < 90^\circ$)



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

КАПИЛЛЯРНОСТЬ

④



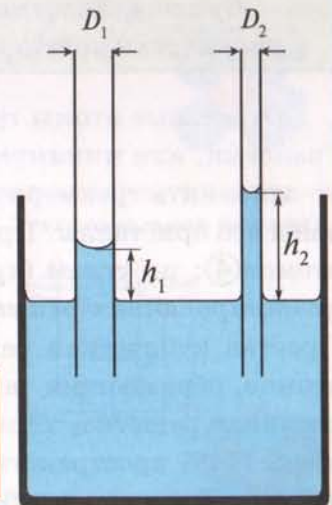
Равновесие жидкости в капилляре

$$F = \sigma \ell$$

$$F = mg$$

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

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



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 .

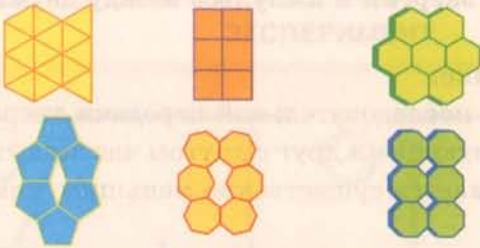
Кристаллические тела могут быть монокристаллическими и поликристаллическими. Внешняя форма *монокристалла* является правильной, отражая упорядоченное внутреннее расположение молекул ⑤. Углы между внешними гранями монокристалла оказываются постоянными. К монокристаллам относятся природные кристаллы (кварц, 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



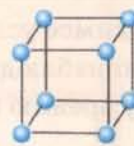
M.C. Escher (Нидерланды)

③ Основные элементы (ячейки) кристаллических решеток

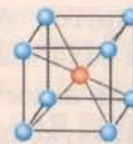
Кристаллическая решетка	Геометрия элемента
■ Кубическая	Куб
■ Тетрагональная	Прямоугольный параллелепипед с квадратом в основании
■ Орторомбическая	Прямоугольный параллелепипед
■ Моноклинная	Восемь углов не прямые, ребра разной длины
■ Триклинная	Нет прямых углов, ребра разной длины
■ Тригональная	Нет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

④ ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

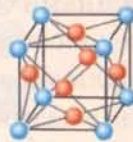
Кубическая решетка



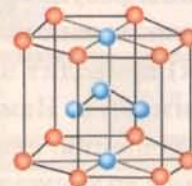
Кубически центрированная решетка



Гранецентрированная решетка



Гексагональная решетка



⑤ МОНОКРИСТАЛЛЫ

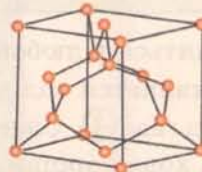
Монокристалл – твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку



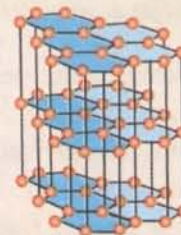
Внешняя форма монокристалла – правильная ввиду упорядоченного внутреннего расположения частиц

⑥ ПОЛИМОРФИЗМ УГЛЕРОДА

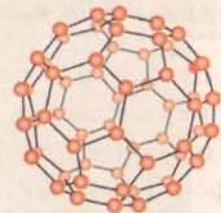
Полиморфизм – существование различных кристаллических структур у одного и того же вещества



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.

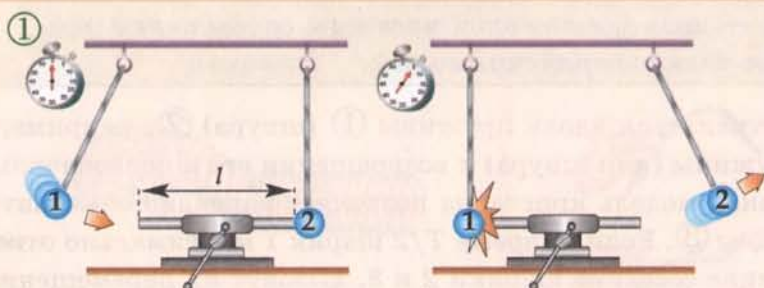
В рассматриваемом случае движение частиц среды происходит вдоль направления распространения волны, т.е. возникает продольная волна.

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

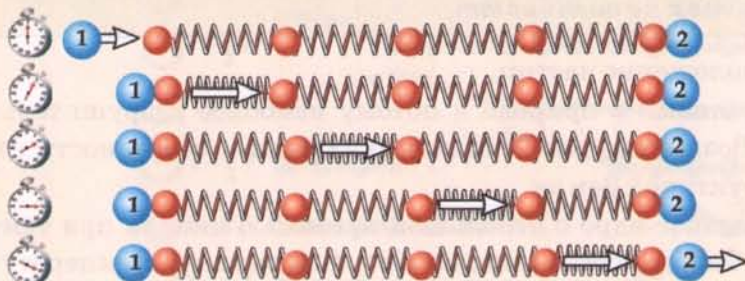


Механическая волна – возмущение, распространяющееся в упругой среде

Наличие упругой среды – необходимое условие распространения механических волн

② Теоретическая модель распространения продольной волны в твердом теле

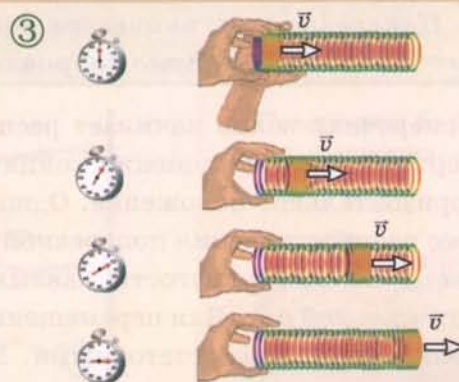
Продольная волна – волна, в которой движение частиц среды происходит в направлении распространения волны



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

ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

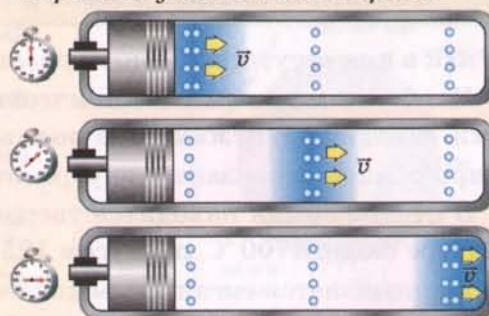
ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА В ПРУЖИНЕ



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

④ ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА В ГАЗЕ

Сжатие газа поршнем изменяет компоненту скорости $\bar{v}$ 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.

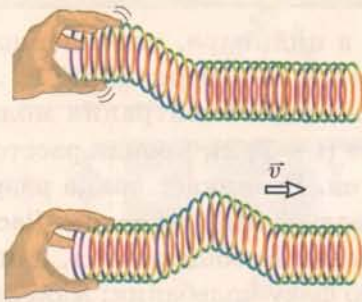
Вокруг жидкого ядра находится мантия из твердых силикатных пород, простирающаяся вплоть до глубины около 30 км от поверхности Земли. Наружный поверхностный шаровой слой составляет твердая земная кора, состоящая из силикатов и минералов.

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.

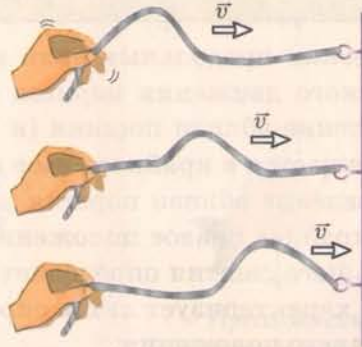
ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

ЭКСПЕРИМЕНТ

① Поперечные механические волны в пружине



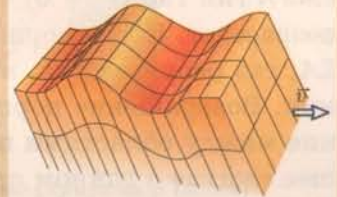
② Поперечные механические волны в шнуре



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

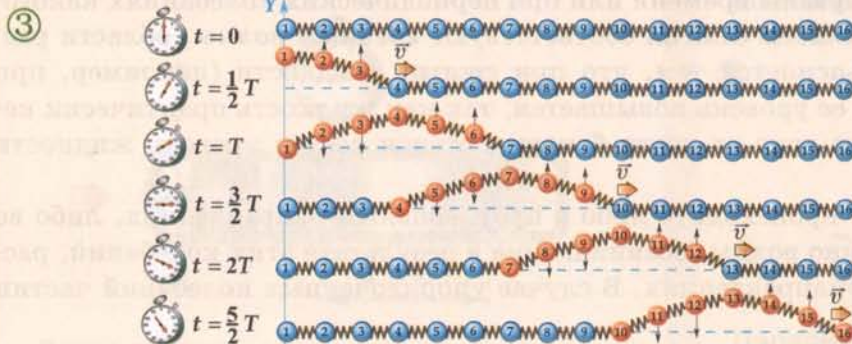
S – ВОЛНЫ

⑤ Поперечные волны в мантии



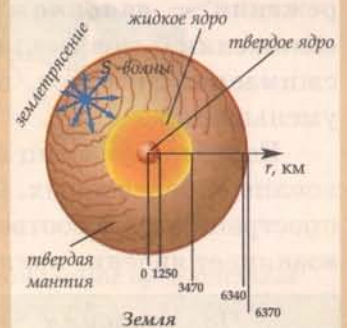
Теоретическая модель распространения поперечной волны в твердом теле

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).

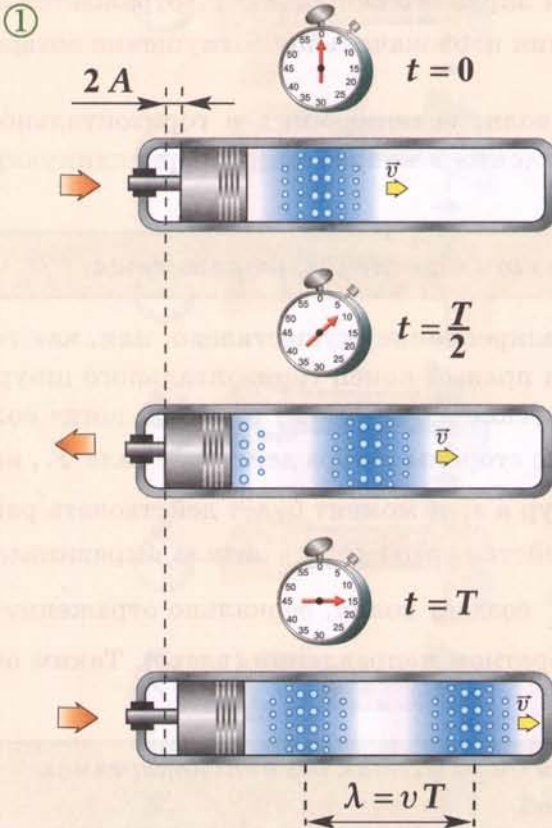
Для выделения волны определенной поляризации используют специальное устройство — *поляризатор*. Простейшим поляризатором является щель ⑤. Такой поляризатор не пропускает волну, поляризованную в плоскости XZ , перпендикулярной щели.

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

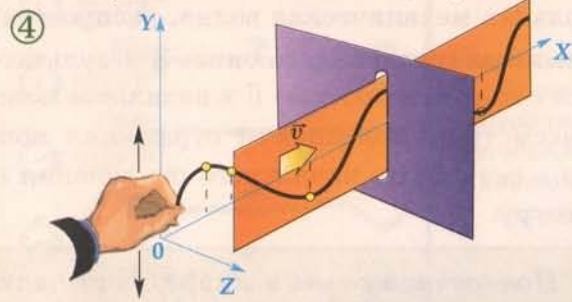


Длина волны – расстояние, на которое распространяется волна за период колебания ее источника: $\lambda = vT$

ПОПЕРЕЧНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Поляризация – пространственная упорядоченность направлений колебаний частиц среды в поперечной волне

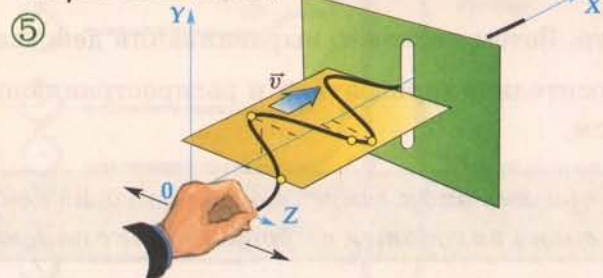
Плоскость поляризации – плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне



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

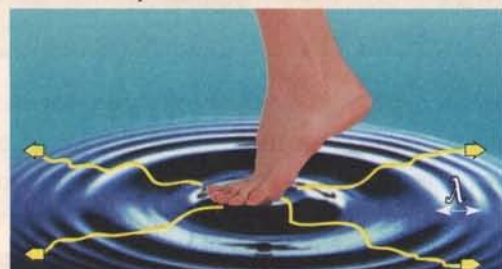
ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЛН

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,

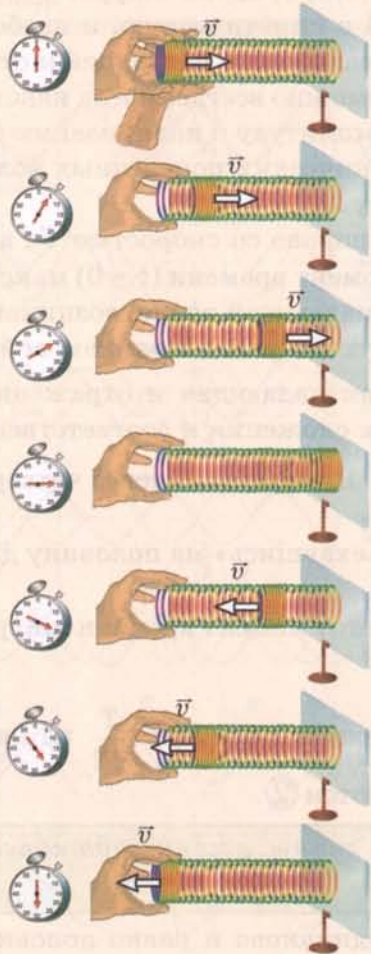
поперечная волна, отраженная от свободного конца шнура, находится в фазе с падающей волной.

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.

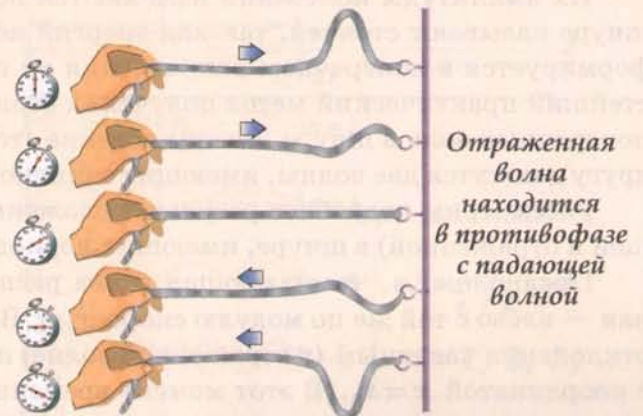
ОТРАЖЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ПРУЖИНЕ

① Правый конец пружины закреплен

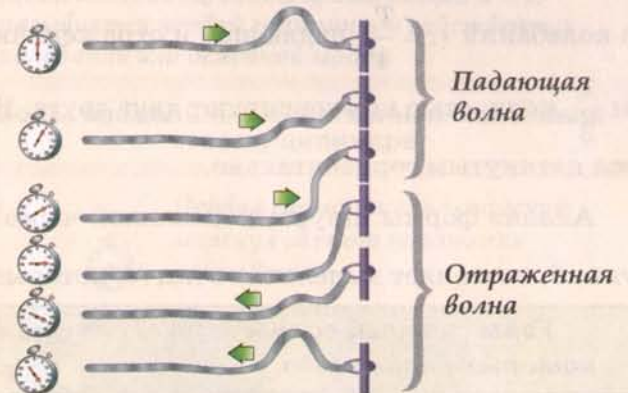


ОТРАЖЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ШНУРЕ

② Правый конец шнура закреплен



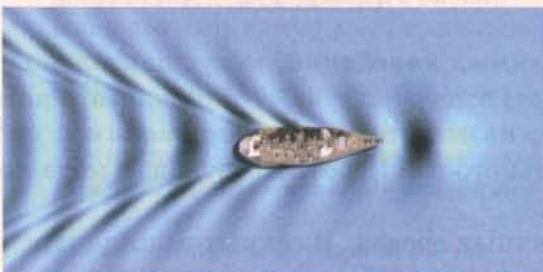
③ Правый конец шнура свободен



Отраженная волна находится в фазе с падающей волной

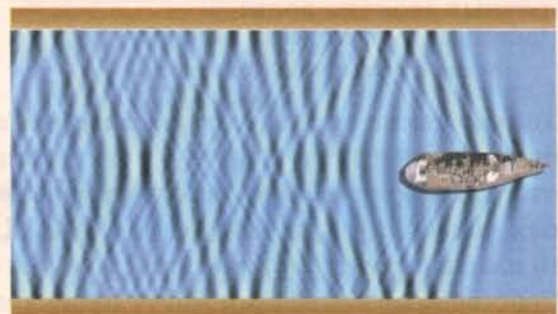
④ ВОЛНЫ НА ОТКРЫТОЙ ВОДЕ

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:

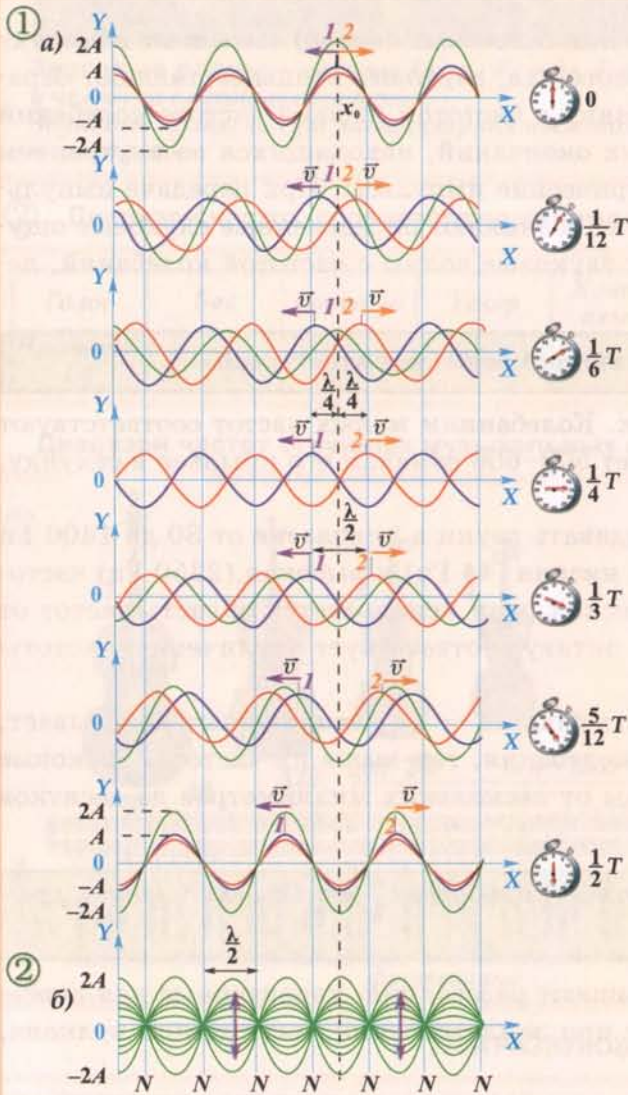
$$\frac{l}{(\lambda/2)} = n. \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

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

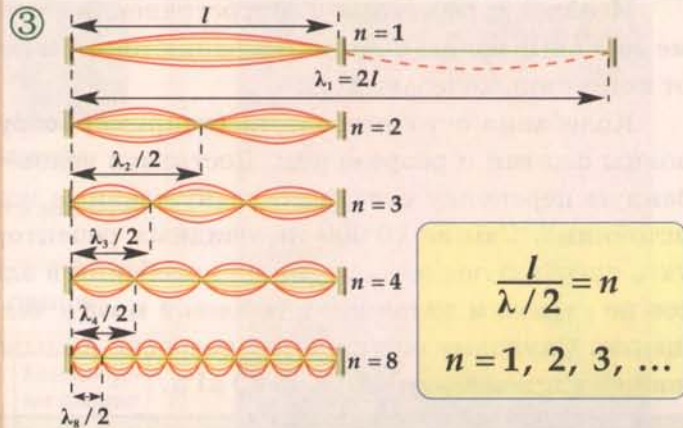
б) Пучности и узлы стоячей волны

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

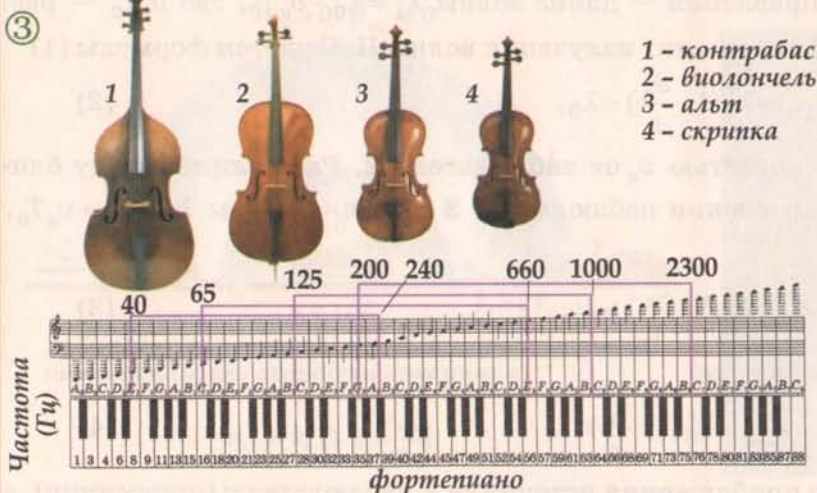


Звуковые волны – упругие волны в среде, вызывающие у человека слуховые ощущения.
Звуковые волны могут распространяться только в материальной среде

② Диапазон частот, соответствующий голосу певца

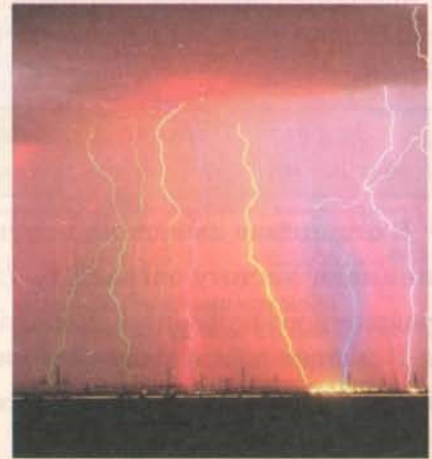
Голос	Бас	Баритон	Тенор	Контральто	Колоратурное сопрано
Частота, Гц	80 – 400	110 – 400	150 – 500	200 – 700	250 – 1400

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

- 1 – источник звука
- 2 – испускаемый сигнал
- 3 – отраженная волна
- 4 – внутреннее ухо

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)).

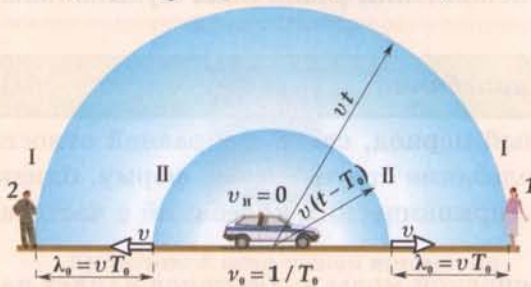
Частота звука от неподвижного источника сигнала зависит от скорости движения приемника ③

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

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

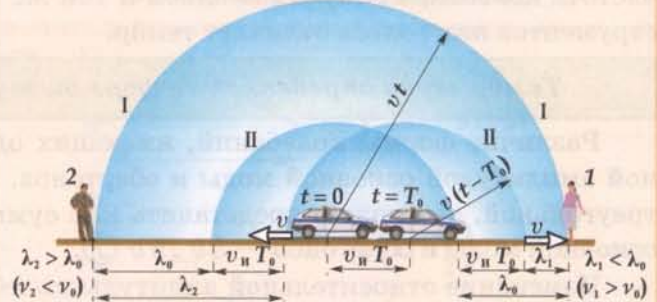
$v_n = 0; v_{пр.} = 0; v$ – скорость звука



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

$v_n \neq 0; v_{пр.} = 0$

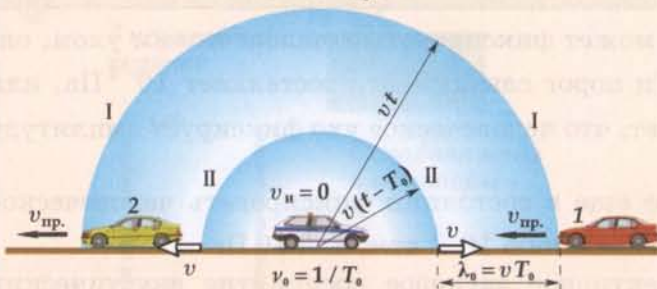


Длина волны λ_1 сигнала, воспринимаемого наблюдателем 1, меньше λ_0 . Длина волны λ_2 сигнала, воспринимаемого наблюдателем 2, больше λ_0

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

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

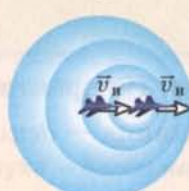


⑤ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

а) $v_n = 0$



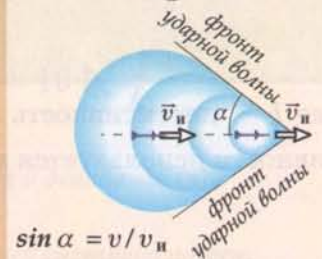
б) $v_n < v$



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)**):

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

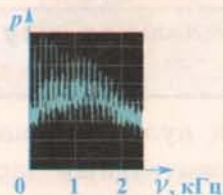
Уровень интенсивности 120 дБ является болевым порогом. Увеличение интенсивности звука на 10 дБ примерно удваивает громкость.

ТЕМБР ЗВУКА

Форма звукового колебания

Основная мода и обертоны

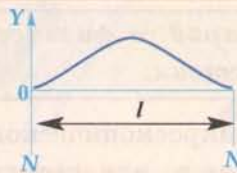
①



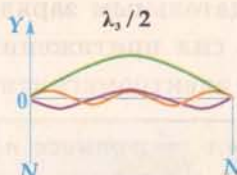
Креcendo в исполнении тромбона



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

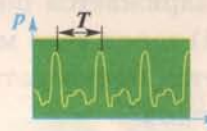


Основная мода и обертоны



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*.

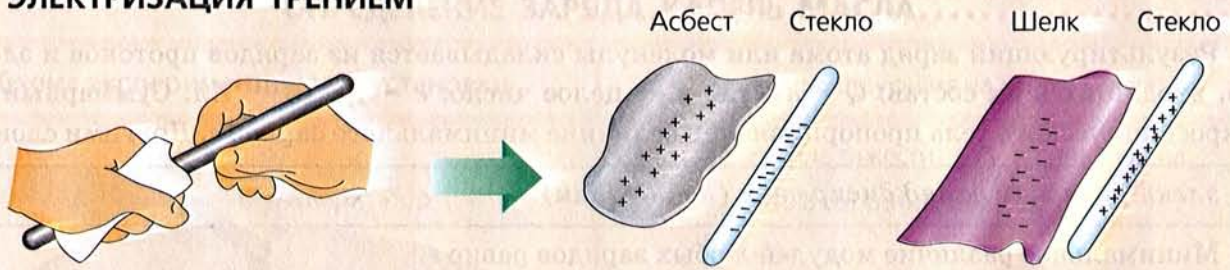
1. Степень электризации тел в результате трения характеризуется значением и знаком электрического заряда, полученного телом. При трении стекла об асбест стекло заряжается отрицательно, а асбест — положительно. В результате трения стекла о шелк стекло заряжается положительно, а шелк — отрицательно. Положительно 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.

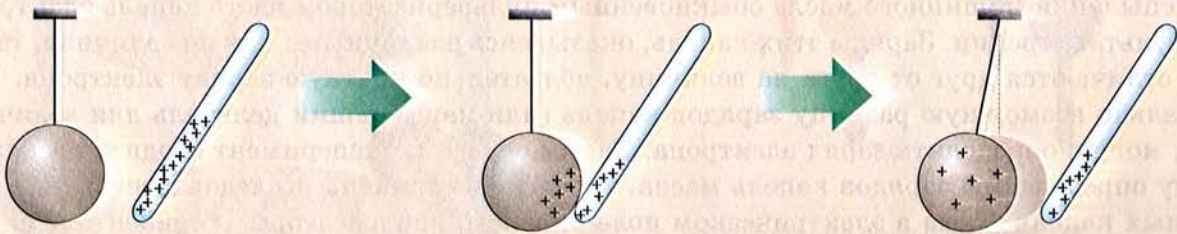
3. Электризация влиянием иллюстрируется перераспределением зарядов на поверхности электронейтральной металлической сферы под действием электрического поля отрицательно заряженного стеклянного стержня. Положительные заряды притягиваются к стержню, отрицательные — отталкиваются от него. В результате соприкосновения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

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

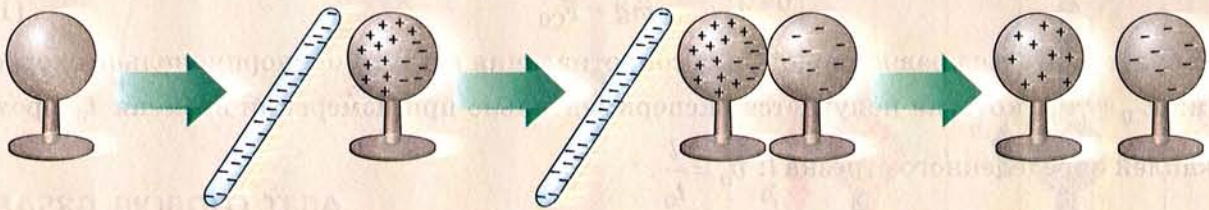
① ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТРЕНИЕМ



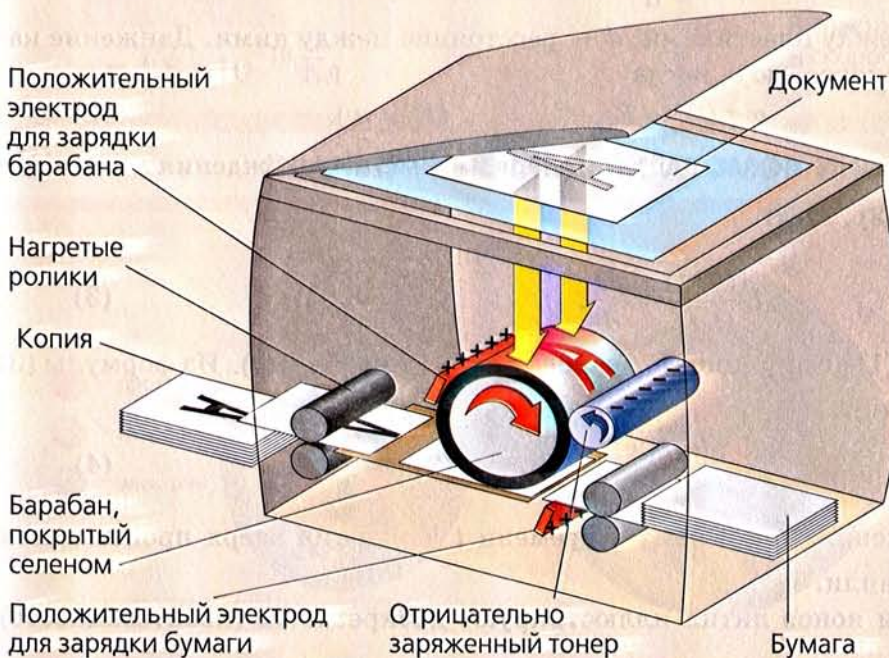
② ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ СОПРИКОСНОВЕНИЕМ



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:

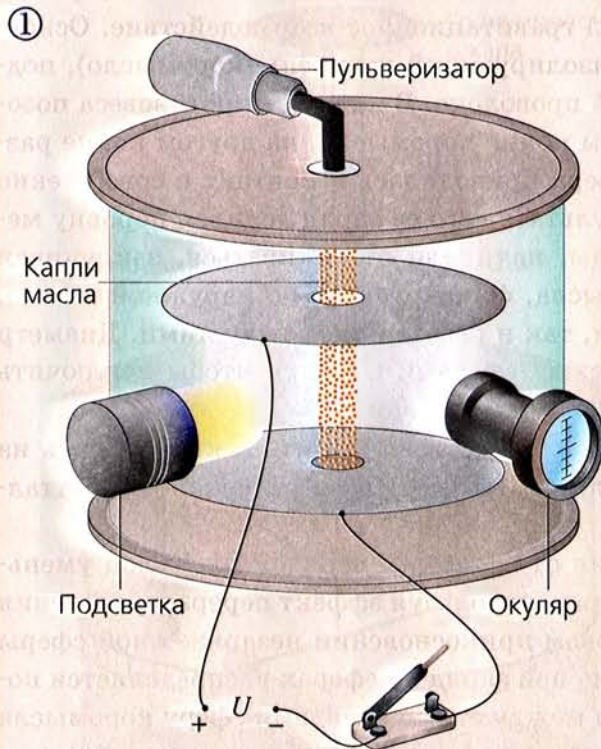
$$q = \frac{\gamma l d (t_0 + t)}{t_0 t U}. \quad (4)$$

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



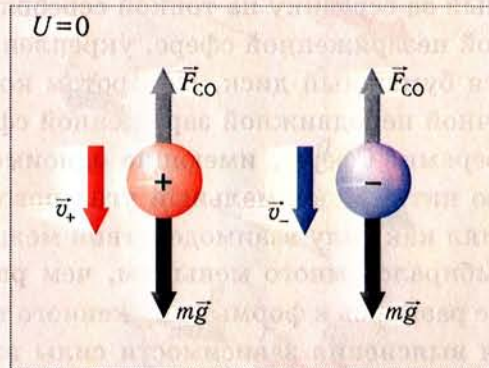
**ЗАРЯД ЛЮБОГО ТЕЛА
КРАТЕН ЗАРЯДУ ЭЛЕКТРОНА**

$$q = Ne$$

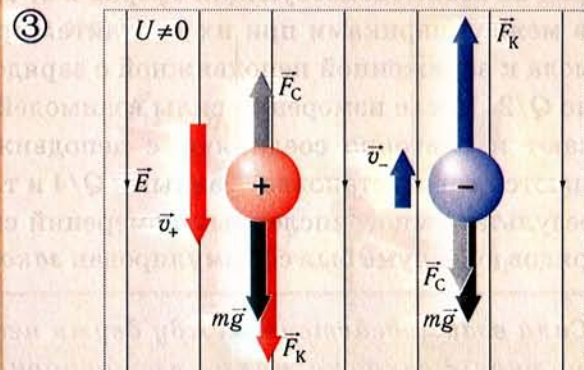
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Силы, действующие на каплю масла:

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

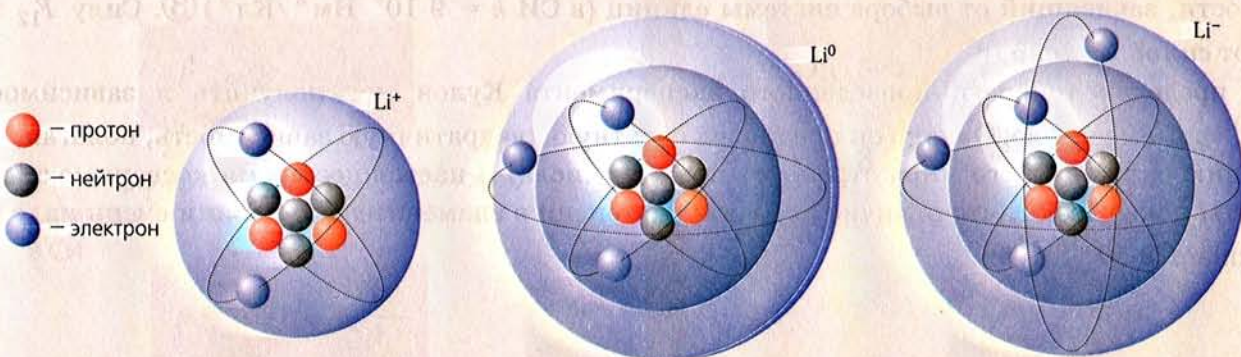


В отсутствие поля направление и скорость движения капли не зависят от ее заряда



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

④ ПЛАНЕТАРНЫЕ МОДЕЛИ АТОМОВ И ИОНОВ ЛИТИЯ



§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:

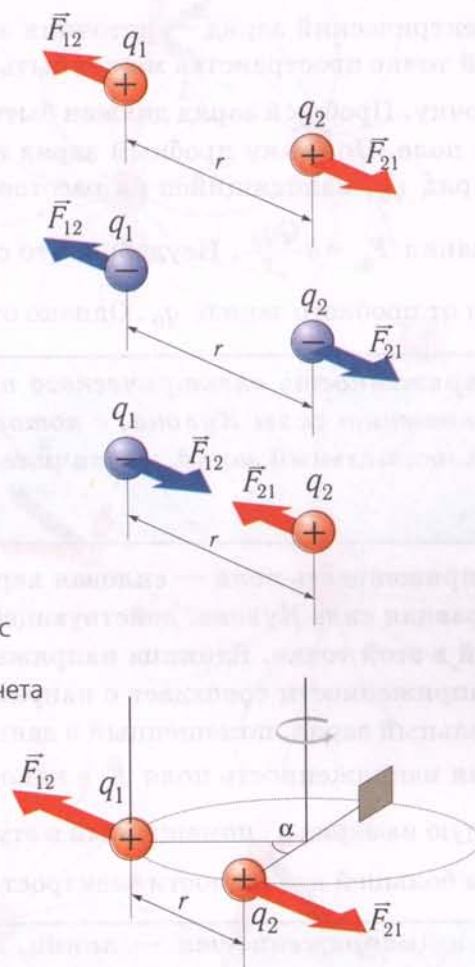
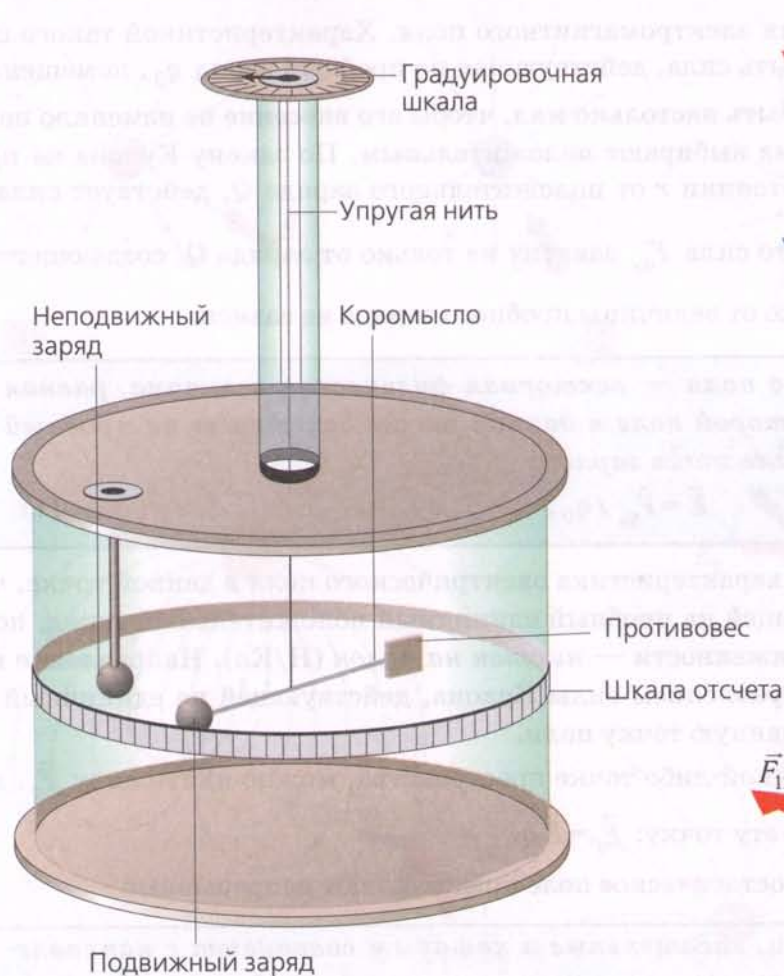
Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по прямой, соединяющей заряды:

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

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:

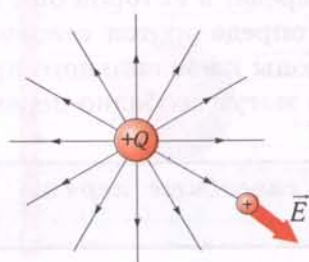
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

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

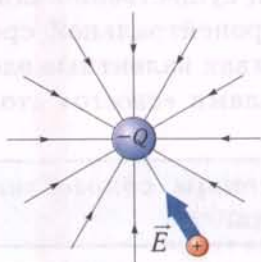
Напряженность поля, созданного точечным положительным зарядом Q , согласно (1) убывает обратно пропорционально квадрату расстояния r от него ⑥:

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

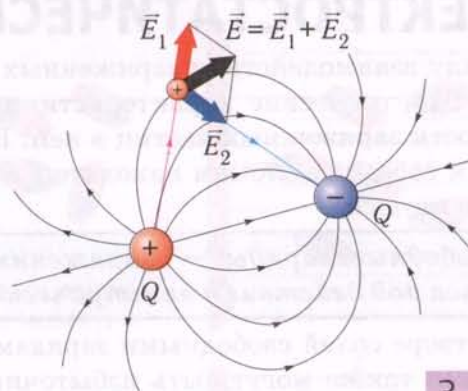
ЛИНИИ НАПРЯЖЕННОСТИ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ



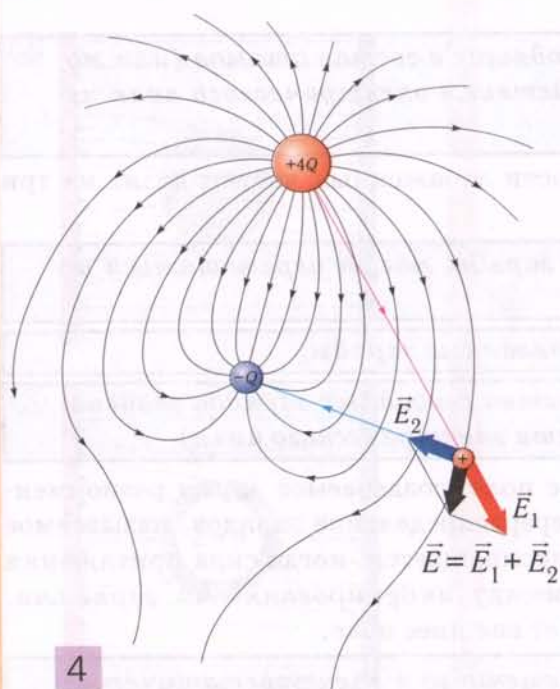
1



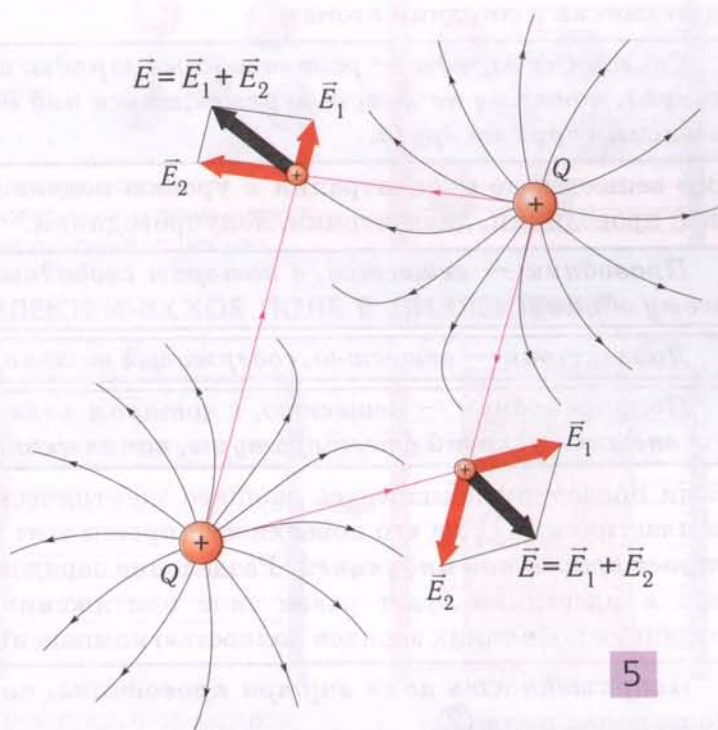
2



3



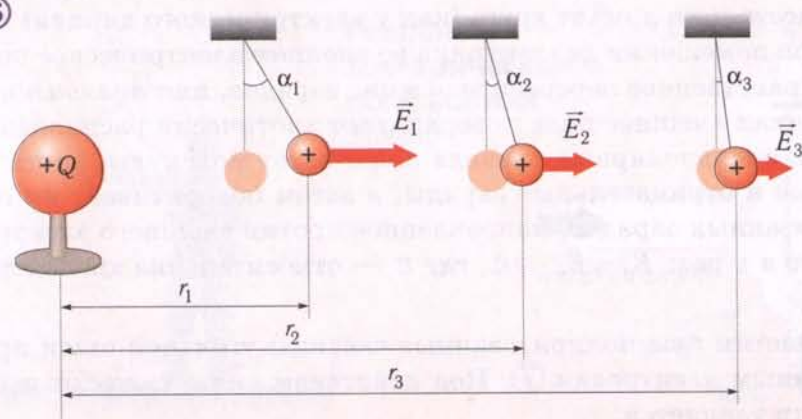
4



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.

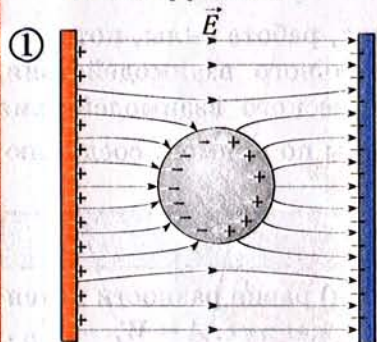
Напряженность поля внутри проводника, помещенного в электростатическое поле, равна нулю ②.

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

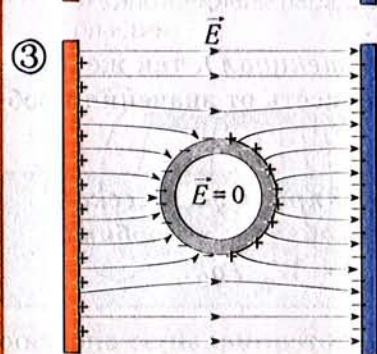
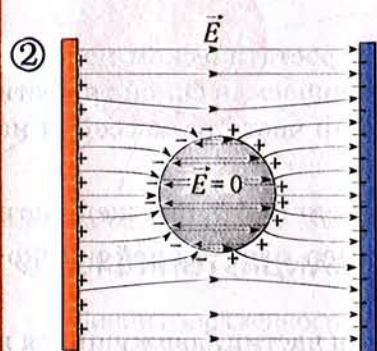
Диэлектрики, в соответствии со структурой молекул, входящих в их состав, делят на **полярные** и **неполярные**. В полярных молекулах центры связанных зарядов (ядер, электронных оболочек) находятся на некотором расстоянии друг от друга (как у электрического диполя) ④, а в неполярных они совпадают ⑤. 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



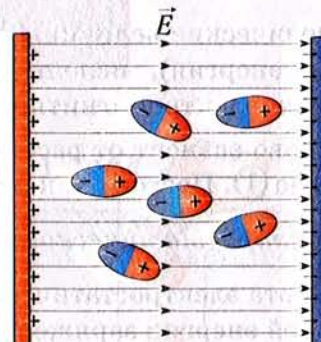
Заряды располагаются на внешней поверхности проводника

ДИЭЛЕКТРИКИ

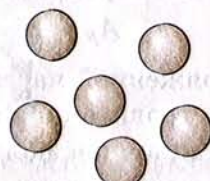
④ Полярные



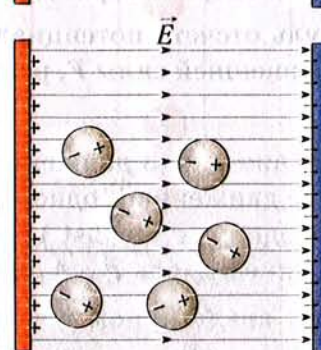
Электрическое поле ориентирует полярные молекулы



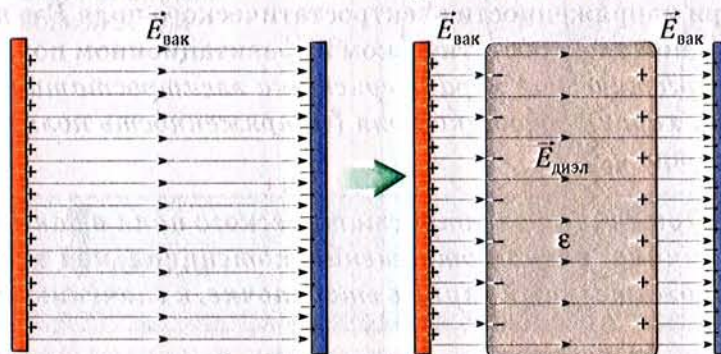
⑤ Неполярные



Электрическое поле поляризует и ориентирует неполярные молекулы

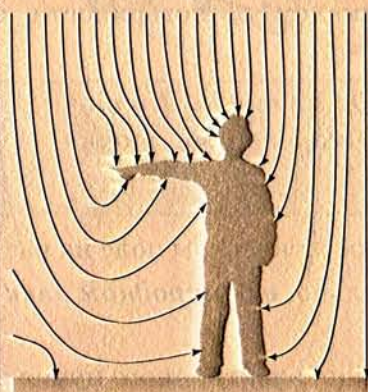


⑥ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

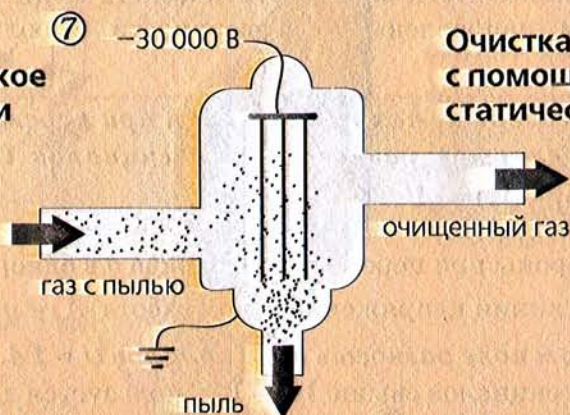


Поле связанных зарядов, направленное против внешнего электрического поля, уменьшает напряженность в ϵ раз

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



Реальное электрическое поле вблизи Земли



Очистка газа от пыли с помощью электростатического поля

очищенный газ

газ с пылью

пыль

§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.

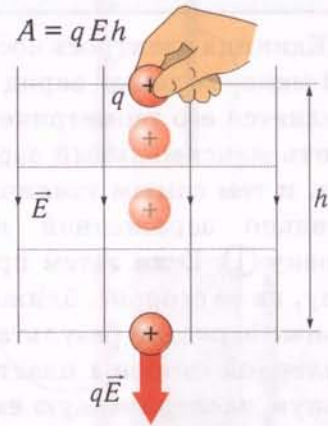
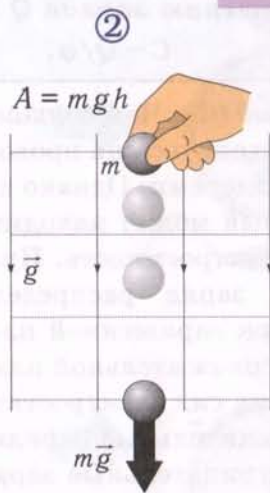
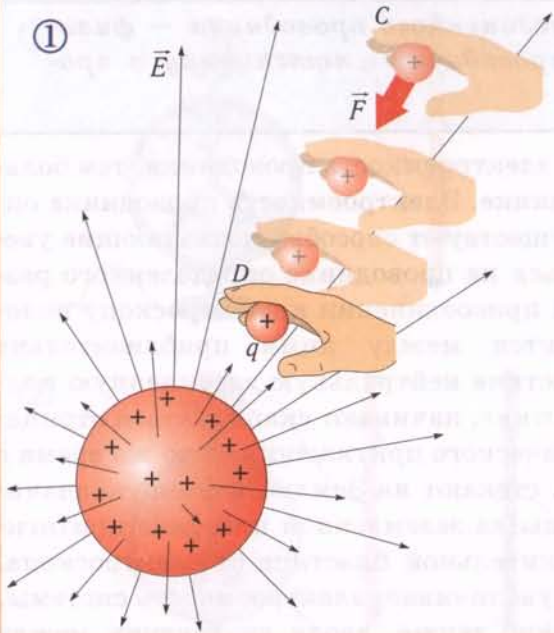
Работа, совершаемая силами поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2, определяется разностью потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$ между этими точками: $A_q = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$.

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

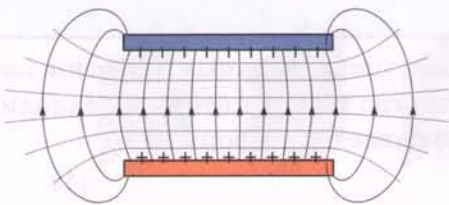
$$A_{CD} = q(\varphi_C - \varphi_D)$$



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

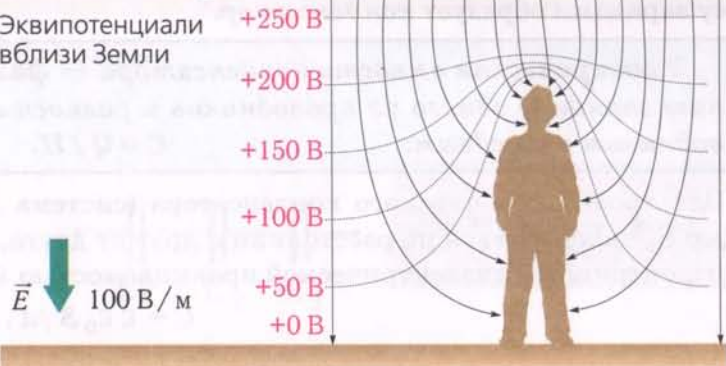
③ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Линии напряженности и эквипотенциали параллельных пластин



④

Эквипотенциали вблизи Земли

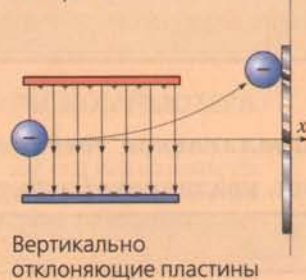


⑤

ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКЕ



Траектория электрона перед попаданием на экран



Вертикально отклоняющие пластины

§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:

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

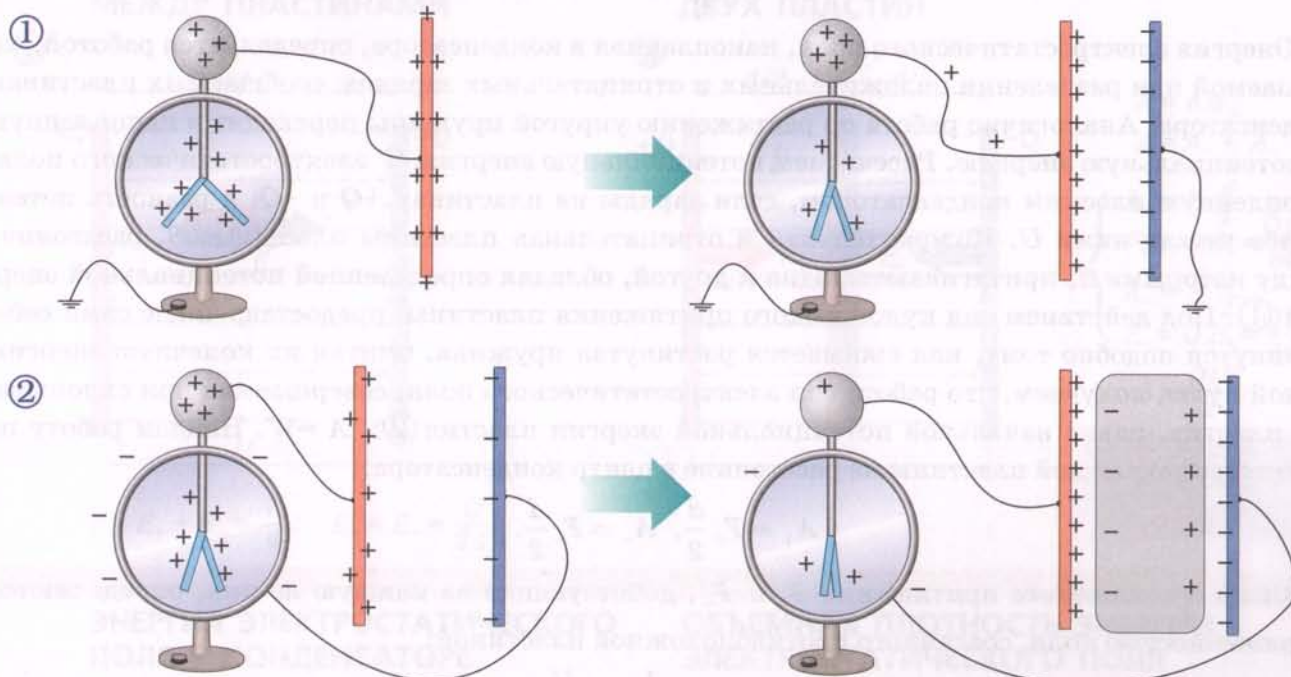
$$C < \{C_1, C_2\}.$$

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

$$C = C_1 + C_2.$$

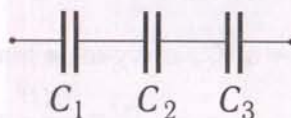
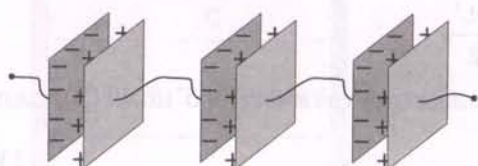
Зависимость электроемкости конденсатора от расстояния между его пластинами используется в схемах кодирования клавиатуры персонального компьютера ⑤. При нажатии на клавишу электроемкость находящегося под ней конденсатора изменяется. Микросхема, подключенная к каждой клавише, при изменении электроемкости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

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА В ПРОВОДНИКАХ



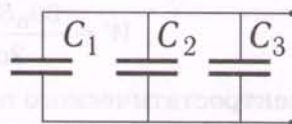
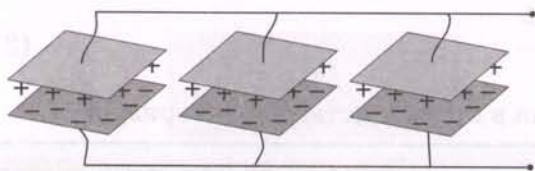
СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

③ Последовательное



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

④ Параллельное

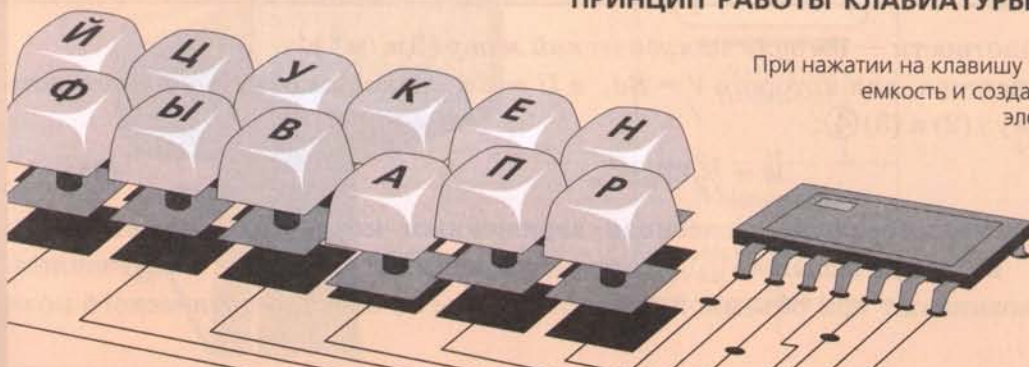


$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

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:

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

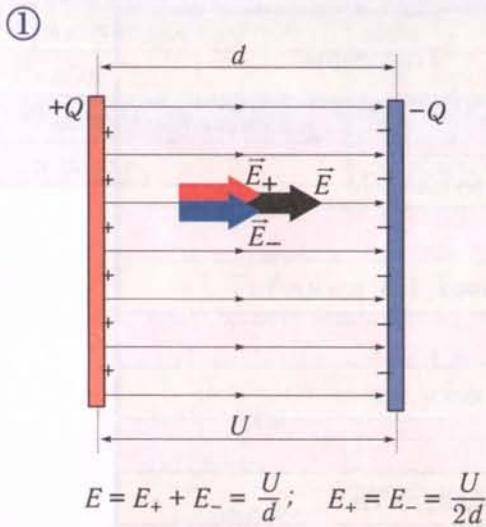
Единица объемной плотности — джоуль на кубический метр ($\text{Дж}/\text{м}^3$).

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

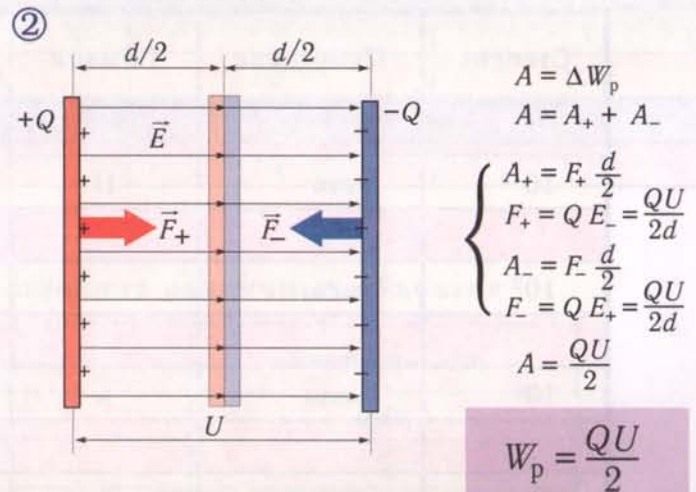
$$w = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2. \quad (4)$$

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 $40\text{--}50 \text{ Дж}/\text{м}^3$.

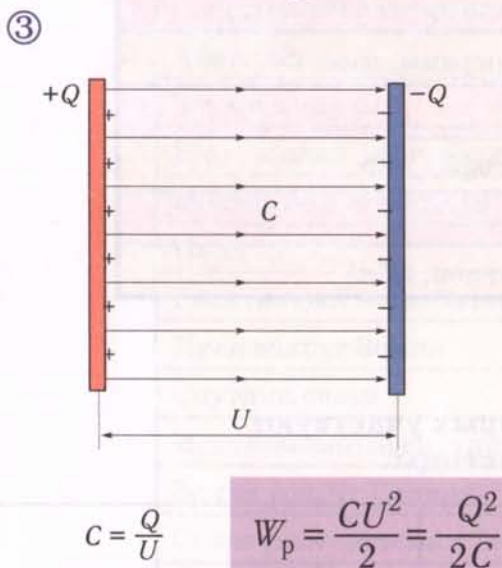
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ



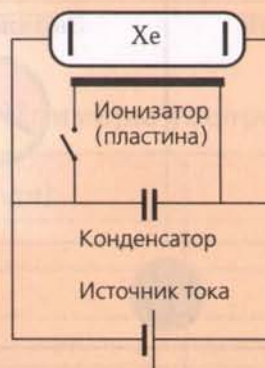
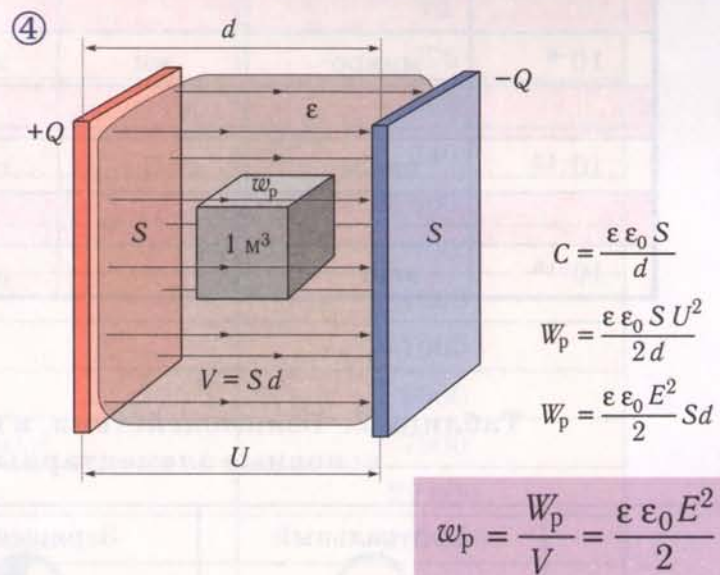
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДВУХ ПЛАСТИН



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 $\rho = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t = 0^\circ\text{C}$

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°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



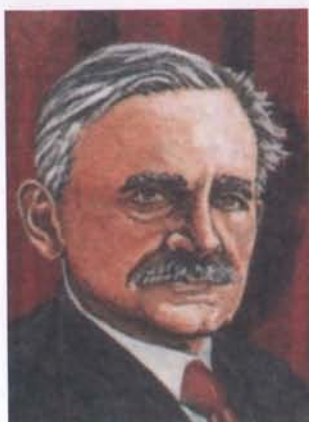
Клапейрон Бенуа 72



Кулон Шарль 120



Майкельсон Альберт 52



Мариотт Эдм 74



Менделеев Дмитрий И. 72



Милликен Роберт 118



Морли Эдуард 52



Ньютон Исаак 20



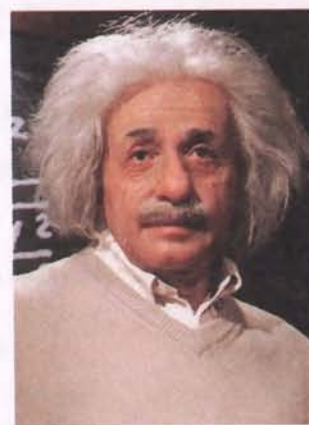
Шарль Жак 78



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

КОНСТАНТА	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
Гравитационная постоянная	G	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Масса электрона	m_e	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса протона	m_p	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса нейтрона	m_n	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

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

КОНСТАНТА	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{кг}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	R	$8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$



ЭЛЕКТРОСТАТИКА

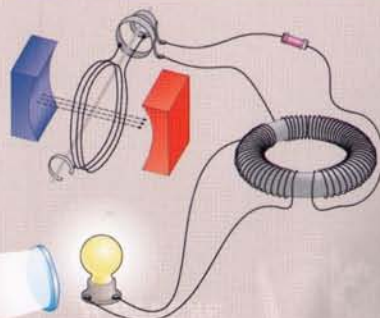
ВЕЛИЧИНА		ЕДИНИЦА	
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Электрический заряд	Q	кулон	Кл
Поверхностная плотность заряда	σ	кулон на квадратный метр	$\text{Кл}/\text{м}^2$
Объемная плотность заряда	ρ	кулон на кубический метр	$\text{Кл}/\text{м}^3$
Напряженность электростатического поля	E	ньютон на кулон	$\text{Н}/\text{Кл}$
Потенциал	ϕ	вольт на метр	$\text{В}/\text{м}$
Электрическая емкость	C	фарад	Ф
Объемная плотность энергии электростатического поля	w	джоуль на кубический метр	$\text{Дж}/\text{м}^3$

КОНСТАНТА	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
Заряд электрона	e	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$
Постоянная Фарадея	F	$9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл}/\text{моль}$
Магнитная проницаемость вакуума	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Вб}/(\text{А} \cdot \text{м})$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА

ВЕЛИЧИНА		ЕДИНИЦА	
НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	НАИМЕНОВАНИЕ	ОБОЗНАЧЕНИЕ
Электрическое сопротивление	R	ом	Ом
Удельное сопротивление	ρ	ом-метр	$\text{Ом} \cdot \text{м}$
Плотность электрического тока	j	ампер на квадратный метр	$\text{А}/\text{м}^2$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл
Магнитный поток	Φ	вебер	Вб
Индуктивность	L	генри	Гн
Взаимная индуктивность	M	генри	Гн
Оптическая сила	D	диоптрия	дптр

КОНСТАНТА	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
Скорость света в вакууме	c	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$
Постоянная Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$



"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