

**СРЕДНЕЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

ФГОС 3+

Т.И. ТРОФИМОВА

ФИЗИКА ОТ А до Я

Справочное пособие

Второе издание, стереотипное

BOOK.ru
ЭЛЕКТРОННО-БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА
КНОРУС • МОСКВА • 2016

УДК 373.167.1:54(075.32)

ББК 22.3я723

Т76

Автор

Т.И. Трофимова, профессор МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики»

Трофимова Т.И.

Т76 Физика от А до Я : справочное пособие / Т.И. Трофимова. — 2-е изд., стер. — М. : КНОРУС, 2016. — 302 с. — (Среднее профессиональное образование).

ISBN 978-5-406-05127-6

DOI 10.15216/978-5-406-05127-6

Охватывает все разделы курса физики средней школы и содержит справочный материал, с помощью которого читатель может восстановить в памяти необходимые определения, законы и формулы. Каждая статья представляет собой краткий конспект ответа на соответствующий вопрос курса. Может быть эффективно использовано при подготовке к зачетам и экзаменам, при решении задач, для систематизации знаний по физике.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для учащихся средних школ, лицеев, техникумов, а также абитуриентов и слушателей подготовительных отделений.

УДК 373.167.1:54(075.32)

ББК 22.3я723

Трофимова Таисия Ивановна

ФИЗИКА ОТ А ДО Я

Сертификат соответствия № РОСС RU.АГ51.Н03820 от 08.09.2015.

Изд. № 10812. Подписано в печать 05.10.2015. Формат 60×90/16.

Гарнитура «SchoolBookС». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,0. Уч.-изд. л. 18,9. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КноРус».

117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.

Тел.: 8-495-741-46-28.

E-mail: office@knorus.ru <http://www.knorus.ru>

Отпечатано в ООО «Контакт».

107150, г. Москва, проезд Подбельского 4-й, д. 3.

ISBN 978-5-406-05127-6

© Трофимова Т.И., 2016

© ООО «Издательство «КноРус», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое вашему вниманию справочное пособие охватывает все разделы курса физики средней школы. При создании пособия автор ставил перед собой две цели: во-первых, пособие должно содержать справочный материал, чтобы читатель мог быстро найти и восстановить в памяти необходимые определения, законы и формулы, а во-вторых, иметь обучающую направленность, поэтому практически каждая статья — краткий конспект ответа на соответствующие вопросы программы курса физики.

О структуре пособия. Материал скомпонован по следующим разделам физики: механика, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика, колебания и волны, оптика, квантовая физика. Расположение материала в основном соответствует школьной программе. Исключение составляют механические и электромагнитные колебания и волны, которые рассматриваются вместе. Это обусловлено тем, что колебания и волны различной физической природы описываются одинаковыми характеристиками и адекватными уравнениями и их совместное рассмотрение, на наш взгляд, поможет более глубоко усвоению этой сложной темы. Все определения физических величин, наименования их единиц, а также сокращенные обозначения приведены в СИ.

Статьи в каждом разделе расположены в алфавитном порядке. Название каждой из них выделено жирным шрифтом и прописными буквами (например, **ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС**). Часто в статьях по мере изложения материала вводятся новые термины, которые отмечаются **жирным шрифтом и строчными буквами**, их определения выделяются *курсивом*. Для облегчения поиска терминов в конце пособия приведен предметный указатель по всем разделам. Если какое-либо слово в статье набрано **р а з р ы д к о й**, значит, в пособии есть либо отдельная статья с таким названием, либо в предметном указателе есть ссылка на рассматриваемый термин, к которой необходимо обратиться для получения дополнительных сведений.

Названия статей часто состоят из двух или большего числа слов. Если термин образован словосочетанием существительного и прилагательного, то на первое место вынесено прилагательное (например, **АТОМНОЕ ЯДРО, ХАРАКТЕРИСТИКИ**). Чтобы найти нужный термин, состоящий из нескольких слов, следует проверить его наличие по всем составляющим его словам. Если в названии статьи присутствует имя собственное, то оно выносится на первое место (например, **ЛЕНЦА ПРАВИЛО**).

Данное пособие может быть эффективно использовано при подготовке к экзаменам, решении задач, а также для систематизации и обобщения знаний по физике. Оно предназначено для учащихся средних школ, лицеев и гимназий, техникумов, абитуриентов и слушателей подготовительных отделений.

ВВЕДЕНИЕ

ГИПОТЕЗА — это научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого-либо явления и требующее проверки на опыте и теоретического обоснования для того, чтобы стать достоверной научной теорией. Гипотезы выдвигаются для объяснения экспериментальных фактов.

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Для построения системы единиц произвольно выбирают единицы для нескольких не зависящих друг от друга физических величин. Эти единицы называются **основными**. Остальные же величины и их единицы выводятся из законов, связывающих эти величины и их единицы с основными. Они называются **производными**.

В настоящее время обязательна к применению в научной, а также в учебной литературе Система интернациональная (СИ), которая строится на семи основных единицах — метр (единица длины), килограмм (единица массы), секунда (единица времени), ампер (единица силы электрического тока), кельвин (единица температуры), моль (единица количества вещества), кандела (единица силы света) — и двух дополнительных — радиан (единица плоского угла) и стерадиан (единица телесного угла).

Метр (м) — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ с.

Килограмм (кг) — масса, равная массе международного прототипа килограмма (платиноиридиевого цилиндра, хранящегося в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа).

Секунда (с) — время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер (А) — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, создает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Кельвин (К) — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль (моль) — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде ^{12}C массой 0,012 кг.

Кандела (кд) — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Радиян (рад) — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Стерadian (ср) — телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Для установления производных единиц используют физические законы, связывающие их с основными единицами. Например, из формулы равномерного прямолинейного движения $v = s/t$ (s — пройденный путь, t — время) производная единица скорости получается равной 1 м/с.

МАТЕРИЯ — окружающий нас мир, все существующее вокруг нас и обнаруживаемое нами посредством ощущений. Неотъемлемым свойством материи и формой ее существования является движение. Движение в широком смысле слова — это всевозможные изменения материи — от простого перемещения до сложнейших процессов мышления.

ОПЫТ (основной метод исследования в физике) — основанное на практике чувственно-эмпирическое познание объективной действительности, т. е. наблюдение исследуемых явлений в точно учитываемых условиях, позволяющих следить за ходом явлений и многократно воспроизводить его при повторении этих условий.

ФИЗИКА — наука о наиболее простых и вместе с тем наиболее общих формах движения материи и их взаимных превращениях. Изучаемые физикой формы движения материи (механическая, тепловая и др.) присутствуют во всех высших и более сложных формах движения материи (химических, биологических и др.). Поэтому они, будучи наиболее простыми, являются в то же время наиболее общими формами движения материи. Высшие и более сложные формы движения материи — предмет изучения других наук (химии, биологии и др.).

Академик А. Ф. Иоффе определил физику как *науку, изучающую общие свойства и законы движения вещества и поля*. В настоящее время общепризнано, что все взаимодействия осуществляются посредством полей, например гравитационных, электромагнитных, полей ядерных сил. Поле, наряду с веществом, является одной из форм существования материи.

Физика тесно связана с естественными науками. Эта теснейшая связь физики с другими отраслями естествознания, как отмечал академик С. И. Вавилов, привела к тому, что физика глубочайшими корнями выросла в астрономию, геологию, химию, биологию и другие естественные науки. В результате образовался ряд новых смежных дисциплин, таких, как астрофизика, биофизика и др.

Физика тесно связана и с техникой, причем эта связь имеет двусторонний характер. Физика выросла из потребностей техники (развитие механики у древних греков, например, было вызвано запросами строительной и военной техники того времени), и техника, в свою очередь, определяет направление физических исследований (например, в свое время задача создания наиболее экономичных тепловых двигателей вызвала бурное развитие термодинамики). С другой стороны, от развития физики зависит технический уровень производства. Физика — база для создания новых отраслей техники (электронная техника, ядерная техника и др.).

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ — *это устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе*. Их устанавливают при обобщении экспериментальных фактов (иногда даже многовековых), а также результатов деятельности людей. Наиболее важные законы определяют связь между физическими величинами. Для этого необходимо измерять физические величины. Измерение физической величины есть действие, выполняемое с помощью средств измерений для нахождения значения физической величины в принятых единицах. Единицы физических величин можно выбрать произвольно, но тогда возникнут трудности при их сравнении. Поэтому целесообразно ввести систему единиц, охватывающую единицы всех физических величин (см. **Единицы физических величин**).

МЕХАНИКА

АРХИМЕДА ЗАКОН — один из основных законов гидродинамики: на тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости (газа) направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа) и приложенная к центру тяжести вытесненного объема:

$$F_A = \rho g V,$$

где ρ — плотность жидкости, V — объем погруженной в жидкость части тела.

На законе Архимеда основана теория плавания тел в жидкостях и газах. Если вес тела P меньше силы Архимеда ($P < F_A$), то тело всплывает до тех пор, пока не будет выполнено условие $\rho g V = P$, если же $P > F_A$, то тело тонет.

БЕРНУЛЛИ УРАВНЕНИЕ связывает скорость и давление в потоке идеальной жидкости (физическая модель, т. е. воображаемая жидкость, в которой отсутствуют силы внутреннего трения):

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости, v — скорость жидкости в сечении трубки тока, находящейся на высоте h , p — статическое давление жидкости (давление жидкости на поверхность обтекаемого ею тела) для определенного сечения трубки тока,

$\frac{\rho v^2}{2}$ — динамическое давление, ρgh — гидростатическое давление.

Уравнение Бернулли для горизонтальной трубки тока имеет вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const},$$

где $\frac{\rho v^2}{2} + p$ называется **полным давлением**.

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости. Оно также хорошо выполняется и для реальных жидкостей, в которых внутреннее трение которых не очень велико.

Из уравнения Бернулли для горизонтальной трубки тока и уравнения неразрывности $Sv = \text{const}$ следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах, т. е. там, где скорость меньше. Это означает, что в местах сужения трубопровода скорость течения жидкости возрастает, а давление понижается. Отметим, что уравнение неразрывности и уравнение Бернулли применимы также и к газам в тех случаях, когда сжимаемостью и вязкостью газа можно пренебречь.

ВЕКТОР ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. Пусть материальная точка движется вдоль произвольной траектории (рис. 1). Отсчет времени начнем с момента, когда точка находилась в положении A . Длина участка траектории AB , пройденного материальной точкой с момента начала отсчета времени, называется **длиной пути** Δs и является **скалярной функцией** времени:

$$\Delta s = \Delta s(t).$$

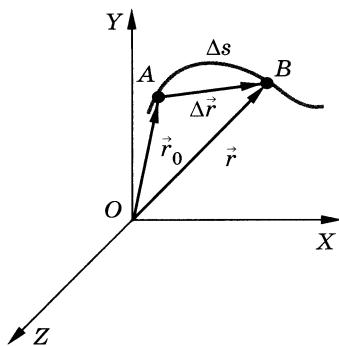


Рис. 1

Вектор $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени), называется **вектором перемещения**.

Пути, пройденные точкой за последовательные промежутки времени, складываются *арифметически*, а векторы перемещений складываются *геометрически* (по правилу сложения векторов).

При прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории и модуль перемещения $|\Delta\vec{r}|$ равен пройденному пути Δs :

$$|\Delta\vec{r}| = \Delta s.$$

ВЕС ТЕЛА — сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору (или подвес), удерживающую тело от свободного падения. С и л а т я ж е с т и F_T приложена к телу, а вес тела P приложен к опоре (или подвесу).

Сила тяжести действует всегда, а вес проявляется только в том случае, когда на тело кроме силы тяжести действуют еще другие силы, вследствие чего тело движется с ускорением \vec{a} , отличным от \vec{g} . Если тело движется в поле тяготения Земли с ускорением $\vec{a} \neq \vec{g}$, то к этому телу приложена дополнительная сила \vec{N} , удовлетворяющая условию:

$$\vec{N} + \vec{F}_T = m\vec{a}.$$

Тогда вес тела

$$\vec{P} = -\vec{N} = \vec{F}_T - m\vec{a} = m\vec{g} - m\vec{a} = m(\vec{g} - \vec{a}),$$

т. е. если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, то $\vec{a} = 0$ и $\vec{P} = m\vec{g}$. Если тело *свободно движется в поле тяготения* по любой траектории и в любом направлении, то $\vec{a} = \vec{g}$ и $\vec{P} = 0$, т. е. *тело будет невесомым*.

Невесомость — состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести. Например, невесомыми являются тела, находящиеся в космических кораблях, свободно движущихся в космосе.

Внешние силы — силы, с которыми на материальные точки механической системы действуют внешние тела.

Внутренние силы — силы взаимодействия между материальными точками механической системы.

Вязкость (внутреннее трение) — свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила.

Сила внутреннего трения \vec{F} тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоя S (рис. 2), и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою. На рис. 2 представлены два слоя, отстоящие друг от друга на расстоянии Δy и движущиеся со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, перпендикулярно скорости течения слоев. Величина

$\frac{\Delta v}{\Delta y}$ показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении y , перпендикулярном направлению движения слоев, и называется **градиентом скорости**. Модуль силы внутреннего трения между слоями жидкости

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta y} \right| S,$$

где коэффициент пропорциональности η , зависящий от природы жидкости, называется **динамической вязкостью** (или просто **вязкостью**).

Единица вязкости — **паскаль-секунда** ($\text{Па} \cdot \text{с}$): $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ равен динамической вязкости среды, в которой при ламинарном

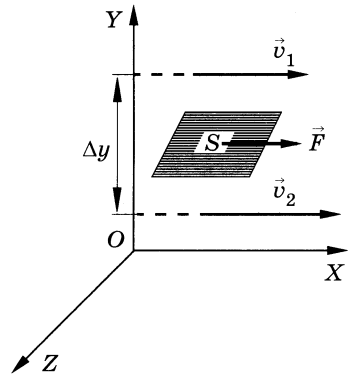


Рис. 2

течении и градиенте скорости с модулем, равным 1 м/с на 1 м , возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м^2 поверхности касания слоев ($1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$).

Чем больше вязкость, тем сильнее жидкость отличается от идеальной, тем бóльшие силы внутреннего трения в ней возникают. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен (для жидкостей η с увеличением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается), что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения. Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел. Например, вязкость касторового масла в интервале $18\text{—}40^\circ\text{C}$ падает в четыре раза. Российский физик П. Л. Капица открыл, что при температуре $2,17 \text{ К}$ жидкий гелий переходит в сверхтекучее состояние, в котором его вязкость равна нулю.

ГАЛИЛЕЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ. Рассмотрим две системы отсчета: и н е р ц и а л ь н у ю с и с т е м у K (с координатами x, y, z), которую условно будем считать неподвижной, и систему K' (с координатами x', y', z'), движущуюся относительно K равномерно и прямолинейно со скоростью \vec{u} ($\vec{u} = \text{const}$). Отсчет времени начнем с момента, когда начала координат обеих систем совпадают. Пусть в произвольный момент времени t расположение этих систем друг относительно друга имеет вид, изображенный на рис. 3. Скорость \vec{u} направлена вдоль OO' , радиус-вектор, проведенный из O в O' , $\vec{r}_0 = \vec{u}t$.

Найдем связь между координатами произвольной точки A в обеих системах. Из рисунка следует, что

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_0 = \vec{r}' + \vec{u}t. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно записать в проекциях на оси координат:

$$\begin{cases} x = x' + u_x t, \\ y = y' + u_y t, \\ z = z' + u_z t. \end{cases} \quad (2)$$

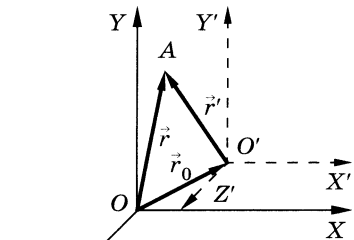


Рис. 3

Уравнения (1) и (2) называют **преобразованиями координат Галилея**.

В частном случае, когда система K' движется со скоростью \vec{u} вдоль положительного направления оси X системы K (в начальный момент времени оси координат совпадают), преобразования координат Галилея имеют вид:

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z'.$$

В классической механике предполагается, что ход времени не зависит от относительного движения систем отсчета, т. е. к преобразованиям (2) можно добавить еще одно уравнение:

$$t = t'.$$

Записанные соотношения справедливы лишь в случае классической механики ($u \ll c$), а при скоростях, сравнимых со скоростью света, преобразования Галилея заменяются более общими преобразованиями Лоренца.

ГАЛИЛЕЯ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ: *во всех инерциальных системах отсчета законы классической механики имеют одинаковую форму.*

Для подтверждения этого вывода рассмотрим преобразования координат Галилея

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t,$$

продифференцировав их по времени (с учетом, что $t = t'$), получим уравнение

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u},$$

которое представляет собой **закон сложения скоростей в классической механике**.

Ускорение в системе отсчета K

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(\vec{v}' + \vec{u})}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{a}'.$$

Таким образом, ускорение точки A в системах отсчета K и K' , движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, одинаково:

$$\vec{a} = \vec{a}'.$$

Следовательно, если на точку A другие тела не действуют ($\vec{a} = 0$), то и $\vec{a}' = 0$, т. е. система K' является инерциальной

(точка движется относительно нее равномерно и прямолинейно или покоится). Отсюда и вытекает подтверждение принципа относительности Галилея: *уравнения динамики при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой не изменяются*. Галилей обратил внимание, что никакими механическими опытами, проведенными в данной инерциальной системе отсчета, нельзя установить, покоится она или движется равномерно и прямолинейно. Например, сидя в каюте корабля, движущегося равномерно и прямолинейно, мы не можем определить, покоится корабль или движется, не выглянув в окно.

ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА — раздел механики, в котором изучается равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействия между собой и обтекаемыми ими твердыми телами. К изучению жидкостей и газов применяется *единый подход*. Хотя свойства жидкостей и газов во многом отличаются, но в ряде механических явлений их поведение описывается одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Кроме того, из опыта известно, что сжимаемостью жидкости и газа во многих задачах можно пренебречь. Поэтому пользуются единым понятием **несжимаемой жидкости** — жидкости, плотность которой всюду одинакова и не изменяется со временем. Гидроаэродинамика подразделяется на гидродинамику и гидростатику.

Гидродинамика — раздел гидроаэромеханики, в котором изучается движение несжимаемых жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами.

Гидростатика — раздел гидроаэромеханики, в котором изучаются равновесие несжимаемой жидкости и воздействие покоящейся жидкости на погруженные в нее тела.

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ. Рассмотрим, как влияет вес жидкости на распределение давления внутри покоящейся несжимаемой жидкости. При равновесии жидкости давление по горизонтали всегда одинаково, иначе жидкость не находилась бы в состоянии покоя. Поэтому свободная поверхность покоящейся жидкости всегда горизонтальна вдали от стенок сосуда. Если жидкость несжимаема, то ее плотность не зависит от давления. При поперечном сечении S столба жидкости, его высоте h и плотности

жидкости ρ вес столба жидкости $P = \rho gSh$, а давление на нижнее основание сосуда

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho gSh}{S} = \rho gh,$$

т. е. давление изменяется линейно с высотой. Давление, обусловленное силой тяжести и зависящее от глубины под поверхностью жидкости, называется **гидростатическим давлением**. Выталкивающая сила (см. **Архимедов закон**) как раз и возникает из-за того, что значения гидростатического давления на разных глубинах различны.

ДАВЛЕНИЕ — физическая величина, определяемая модулем силы, действующей на единицу площади поверхности тела перпендикулярно к ней:

$$p = \frac{\Delta F_n}{\Delta S}.$$

Если силы распределены вдоль поверхности равномерно, то $p = \frac{F}{S}$.

Единица давления — **паскаль (Па)**: 1 Па равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2 ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ — физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}.$$

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. Это движение удобно рассматривать в два этапа (рис. 4).

1) *Движение вертикально вверх с начальной скоростью v_0 и ускорением $a = -g$.* В высшей точке подъема скорость тела $v_t = 0$. Тогда из соотношений

$$\begin{cases} 0 = v_0 - gt, \\ 0 - v_0^2 = -2gh \end{cases}$$

можно определить время и высоту подъема:

$$t = \frac{v_0}{g}, \quad h = \frac{v_0^2}{g}.$$

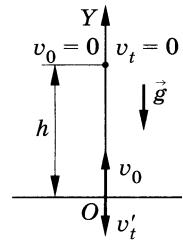


Рис. 4

2) Свободное падение от максимальной точки подъема. Обозначив за v'_t конечную скорость падения, t' — время падения и учитывая, что высота падения равна высоте подъема, можно записать:

$$\begin{cases} v'_t = 0 + gt', \\ (v'_t)^2 - 0 = 2gh = 2g \frac{v_0^2}{g}, \end{cases}$$

откуда следует, что $v'_t = v_0$ и $t' = t$, т. е. конечная скорость падения равна начальной скорости бросания, время падения равно времени подъема. Сопротивление воздуха при расчетах не учитывалось.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО. Движение тела, брошенного горизонтально с начальной скоростью \vec{v}_0 с высоты h , можно рассматривать как результат двух независимых движений (рис. 5):

1) горизонтального равномерного со скоростью $\vec{v}_0 = \text{const}$;

2) вертикального свободного падения с ускорением \vec{g} ($v_{0y} = 0$).

Траектория тела, брошенного горизонтально, представляет собой параболу, и уравнение траектории в системе координат XU имеет вид:

$$y = \frac{g}{2v_0} x^2$$

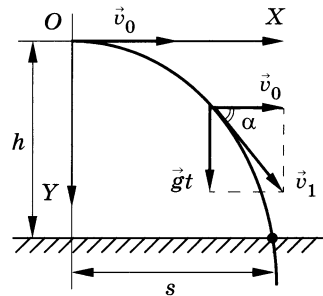


Рис. 5

(получено при исключении времени из уравнений $x = v_0 t$;

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

Вектор мгновенной скорости \vec{v} в каждой точке траектории направлен по касательной к ней и в любой момент времени t определяется из уравнения:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t,$$

а модуль мгновенной скорости рассчитывается по формуле:

$$v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}.$$

Горизонтальная дальность полета

$$s = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

(получена из уравнения движения по горизонтали $s = v_0 t$. Так как время движения по горизонтали равно времени свободного падения, то время t можно определить по заданной высоте $h = \frac{gt^2}{2}$). Сопротивление воздуха при расчетах не учитывалось.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. Движение тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью \vec{v}_0 (рис. 6), складывается из:

- 1) горизонтального равномерного движения со скоростью $v_x = v_{0x} = \text{const}$;
- 2) движения тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью v_{0y} .

Учитывая, что проекции начальной скорости на оси координат

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha,$$

получим уравнения для проекции скорости в любой момент времени при подъеме до верхней точки траектории:

$$v_x = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

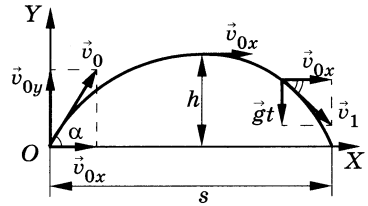


Рис. 6

Из рис. 6 следует, что модуль мгновенной скорости в каждой точке траектории

$$\text{при подъеме: } v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(v_0 \cos \alpha)^2 + (v_0 \sin \alpha + gt)^2},$$

$$\text{при спуске: } v_1 = \sqrt{v_{0x}^2 + (gt)^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + g^2 t^2}.$$

Основные формулы для движения тела, брошенного под углом к горизонту:

$$\text{время подъема: } t_n = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

(в верхней точке $v_y = 0$; $0 = v_0 \sin \alpha - gt_{\Pi}$),

$$\text{общее время движения: } t_{\text{общ}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

(время подъема равно времени падения),

$$\text{дальность броска: } s = \frac{v_0^2 \sin \alpha}{g}$$

($s = v_{0x} t_{\text{общ}} = v_0 t_{\text{общ}} \cos \alpha$),

$$\text{максимальная высота подъема: } h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

$$\left(h = v_{0y} t_{\Pi} - \frac{gt_{\Pi}^2}{2} = v_0 t_{\Pi} \sin \alpha - \frac{gt_{\Pi}^2}{2} \right).$$

Сопротивление воздуха при расчетах не учитывалось.

ДИССИПАТИВНАЯ СИЛА — сила, работа которой при перемещении точки (тела) из одного положения в другое зависит от траектории движения точки (тела).

ДИССИПАТИВНАЯ СИСТЕМА — система, в которой механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии, т. е. система, в которой происходит **диссипация (рассеяние) энергии**.

ДЛИНА ТЕЛ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА. Если в системе отсчета K , относительно которой стержень покоится, его длина l_0 (стержень расположен вдоль оси OX), то в системе K' , относительно которой стержень движется со скоростью v , его длина

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ — так называемое лоренцево сокращение длины.}$$

Таким образом, длина движущегося стержня меньше длины, измеренной в системе, относительно которой он покоится (меньше *собственной длины*) и в разных инерциальных системах отсчета различна.

Лоренцево сокращение длины — эффект *кинематический и взаимный*: если в системах K и K' есть два одинаковых стержня, то с точки зрения каждой из них короче тот стержень, который движется относительно нее.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА. Если в системе отсчета K интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке, равен τ_0 , то интервал времени между этими событиями в системе K' (она движется относительно системы K со скоростью v)

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ — так называемое релятивистское замедление}$$

времени.

Таким образом, длительность события, происходящего в некоторой точке, *наименьшая в той инерциальной системе отсчета, относительно которой эта система неподвижна*. Следовательно, часы, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета, идут медленнее покоящихся часов. Этот эффект *кинематический и взаимный*: если с точки зрения K -системы медленнее идут часы K' -системы, то с точки зрения K' -системы, наоборот, медленнее идут часы K -системы (причем в том же отношении).

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. Ньютон, изучая движение небесных тел, на основании законов Кеплера и основных законов динамики открыл всеобщий закон **всемирного тяготения**: *между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек (m_1 и m_2) и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними (r^2):*

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

Закон всемирного тяготения установлен для тел, принимаемых за материальные точки, т. е. для таких тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними. Сила F называется **гравитационной** (или **силой всемирного тяготения**). Силы тяготения всегда являются силами притяжения и направлены вдоль прямой, проходящей через центры взаимодействующих тел. Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной**:

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

Впервые экспериментальное доказательство закона всемирного тяготения для земных тел, а также числовое определение гравитационной постоянной G проведено английским физиком Г. Кавендишем. Принципиальная схема опыта Кавендиша, применившего **крутильные весы**, представлена на рис. 7. Легкое коромысло A с двумя одинаковыми шариками массой $m = 729$ г подвешено на упругой нити B . На коромысле C укреплены на той же высоте массивные шары массой $M = 158$ кг. Поворачивая коромысло C вокруг вертикальной оси, можно изменять расстояние между шарами с массами m и M . Под действием пары сил, приложенных к шарам m со стороны шаров M , коромысло A поворачивается в горизонтальной плоскости, закручивая нить B до тех пор, пока момент сил упругости не уравнивает момента сил тяготения. Зная упругие свойства нити, по измеренному углу поворота можно найти возникающие силы притяжения, а так как массы шаров известны, то можно вычислить значение G .

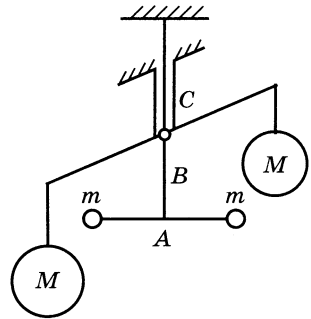


Рис. 7

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА. Рассмотрим механическую систему, состоящую из n тел, масса и скорость которых соответственно равны m_1, m_2, \dots, m_n и $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$. Пусть $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_n$ — равнодействующие внутренних сил, действующих на каждое из этих тел, а $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ —

равнодействующие в н е ш н и х с и л. Запишем второй закон Ньютона для каждого из n тел механической системы:

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1) = \vec{f}_1 + \vec{F}_1,$$

$$\frac{d}{dt}(m_2\vec{v}_2) = \vec{f}_2 + \vec{F}_2,$$

.....

$$\frac{d}{dt}(m_n\vec{v}_n) = \vec{f}_n + \vec{F}_n.$$

Складывая почленно эти уравнения, получаем

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) = \vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \dots + \vec{f}_n + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Так как геометрическая сумма внутренних сил механической системы по третьему закону Ньютона равна нулю, то

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n,$$

или

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n,$$

где $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i$ — импульс системы.

В случае отсутствия внешних сил (замкнутая система)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt}(m_i\vec{v}_i) = 0, \text{ т. е. } \vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i = \text{const.}$$

Последнее выражение и является **законом сохранения импульса**: *импульс замкнутой системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени, или, иначе говоря, в замкнутой системе тел геометрическая сумма импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.*

Закон сохранения импульса справедлив не только в классической физике, хотя он и получен как следствие законов Нью-

тона. Эксперименты доказывают, что он выполняется и для замкнутых систем микрочастиц (они подчиняются законам квантовой механики). Этот закон носит универсальный характер, т. е. закон сохранения импульса — *фундаментальный закон природы*.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА — момент импульса замкнутой системы сохраняется (т. е. не изменяется с течением времени).

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ПОЛНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: *полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих посредством сил тяготения или сил упругости, остается постоянной при любых движениях тел системы.*

Рассмотрим взаимопревращение кинетической и потенциальной энергии в замкнутой системе. Если тела замкнутой системы взаимодействуют друг с другом посредством сил тяжести или сил упругости, то

$$A = -(E_{п2} - E_{п1}) \text{ и } A = E_{к2} - E_{к1},$$

откуда

$$E_{к2} - E_{к1} = -(E_{п2} - E_{п1}),$$

где $E_{к1}$, $E_{к2}$, $E_{п1}$, $E_{п2}$ — соответственно общая кинетическая энергия системы тел в два разных момента времени и потенциальная энергия системы тел в те же два разных момента времени. Следовательно,

$$E_{к1} + E_{п1} = E_{к1} + E_{п2} —$$

закон сохранения полной механической энергии.

Более общая формулировка закона сохранения полной механической энергии: в системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется со временем:

$$E = E_{к} + E_{п} = \text{const},$$

или, другими словами, в консервативных системах *полная механическая энергия сохраняется.*

В консервативных системах могут происходить лишь превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно в

эквивалентных количествах так, что полная энергия остается неизменной. Этот закон не есть просто закон *количественного* сохранения энергии, а **закон сохранения и превращения энергии**, выражающий и *качественную* сторону взаимного превращения различных форм движения друг в друга. Закон сохранения и превращения энергии — *фундаментальный закон природы*.

ЗАМКНУТАЯ (ИЗОЛИРОВАННАЯ) СИСТЕМА — механическая система тел, на которую не действуют внешние силы.

ИМПУЛЬС (КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ) материальной точки (тела) — векторная величина, численно равная произведению массы материальной точки (тела) на ее скорость и имеющая направление скорости:

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

Единица импульса — **килограмм-метр в секунду** (кг · м/с): 1 кг · м/с равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

ИНЕРТНОСТЬ — свойство тела оказывать сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению). Инертность присуща всем телам, но в разной степени. Из двух взаимодействующих тел более инертно то, которое медленнее изменяет свою скорость. Мерой инертности тела в поступательном движении является его **м а с с а**.

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА — система отсчета, относительно которой материальная точка, свободная от внешних воздействий, либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

Механическое движение относительно, и его характер зависит от выбора системы отсчета. Первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчета, а только в инерциальных.

Опытным путем установлено, что инерциальной можно считать **гелиоцентрическую (звездную) систему отсчета** (начало координат находится в центре Солнца, а оси проведены в направлении трех далеких звезд). Система отсчета, связанная с Землей, строго говоря, **н е и н е р ц и а л ь н а**, однако эффекты, обусловленные ее неинерциальностью (Земля вращается

вокруг собственной оси и вокруг Солнца), незначительны. При решении многих задач ими можно пренебречь.

КЕПЛЕРА ЗАКОНЫ — законы движения планет вокруг Солнца.

Первый закон. Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Второй закон. Радиус-вектор, проведенный из центра Солнца в центр планеты, за равные промежутки времени описывает одинаковые площади.

Третий закон. Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ механической системы — энергия механического движения этой системы.

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , определяется работой, которую надо совершить, чтобы сообщить телу данную скорость:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Поскольку кинетическая энергия системы зависит от скоростей ее тел, а скорости зависят от выбора системы отсчета, то в разных инерциальных системах отсчета, движущихся друг относительно друга, скорость тела, а следовательно, и его кинетическая энергия будут неодинаковы. Кинетическая энергия всегда *положительна*.

КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ

Первая космическая скорость v_1 — минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите, т. е. стало искусственным спутником Земли. На спутник, движущийся по круговой орбите радиусом r , действует сила тяготения Земли, сообщающая ему нормальное ускорение v_1^2/r . По второму закону Ньютона

$$\frac{GmM}{r^2} = \frac{mv_1^2}{r},$$

где G — гравитационная постоянная, а M — масса Земли.

Если спутник движется вблизи поверхности Земли, то $r \approx R_0$ (радиус Земли) и $g = GM/R_0^2$, поэтому у поверхности Земли

$$v_1 = \sqrt{gR_0} = 7,9 \text{ км/с.}$$

Вторая космическая (или параболическая) скорость — наименьшая скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и превратиться в спутник Солнца, т. е. чтобы его орбита в поле тяготения Земли стала параболической.

Третья космическая скорость — скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца. Третья космическая скорость $v_3 = 16,7$ км/с.

ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ — такое движение жидкости, при котором каждый выделенный вдоль потока тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними. Ламинарное течение называется также *слоистым*. Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

ЛОРЕНЦА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. Анализ явлений в инерциальных системах отсчета, проведенный А. Эйнштейном на основе сформулированных им постулатов, показал, что классические преобразования Галилея несовместимы с ними и, следовательно, должны быть заменены преобразованиями, удовлетворяющими постулатам теории относительности.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета: K (с координатами x, y, z) и K' (с координатами x', y', z'), движущуюся относительно K (вдоль оси X) со скоростью $\vec{v} = \text{const}$ (рис. 8). Переход от одной инерциальной системы к другой осуществля-

ются посредством **преобразований Лоренца**:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

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

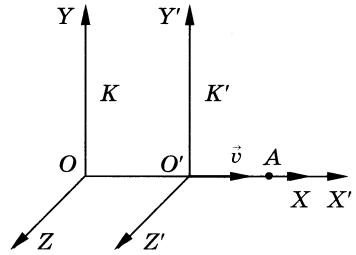


Рис. 8

Из преобразований Лоренца вытекает, что при малых скоростях (по сравнению со скоростью c) они переходят в классические преобразования Галилея, которые являются, следовательно, *предельным случаем преобразований Лоренца*. При $v > c$ выражения для x , t , x' , t' теряют физический смысл (становятся мнимыми). Это соответствует постулату Эйнштейна, что движение со скоростью, большей скорости распространения света в вакууме, невозможно.

Из преобразований Лоренца следует важный вывод, что *расстояние и промежуток времени между двумя событиями меняются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой*, в то время как в рамках преобразований Галилея эти величины считались абсолютными, не изменяющимися при переходе от системы к системе. Кроме того, пространственные и временные преобразования не являются независимыми, поскольку в закон преобразования координат входит время, а в закон преобразования времени — пространственные координаты, т. е. устанавливается взаимосвязь пространства и времени.

МАССА ТЕЛА — физическая величина, являющаяся мерой его инерционных (*инертная масса*) и гравитационных (*гравитационная масса*) свойств. В настоящее время можно считать доказанным, что инертная и гравитационная массы равны друг другу (с точностью, не меньшей 10^{-12} их значения). Поэтому, рассматривая массу, не уточняют, какая из них имеется в виду, а просто говорят о массе тела.

Единица массы — **килограмм** (кг) (*основная единица*) (см. Единицы физических величин).

МЕХАНИКА, СТРУКТУРА. Механика — часть физики, в которой изучаются закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Механика делится на: 1) **классическую** (механика Галилея—Ньютона): в ней изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме; 2) **релятивистскую** (основана на специальной теории относительности): в ней рассматриваются законы движения макроскопических тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме; 3) **квантовую** (волновая механика): в ней описываются законы движения микроскопических тел (отдельных атомов и элементарных частиц).

Классическую механику составляют кинематика, динамика и статика.

Кинематика описывает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обуславливают.

Динамика изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

Статика рассматривает условия равновесия системы тел. Если известны законы движения тел, то из них можно установить и условия равновесия.

МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — совокупность материальных точек (тел), рассматриваемых как единое целое.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ — изменение положения тела (или его частей) в пространстве с течением времени относительно других тел.

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА (МОМЕНТ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ) материальной точки массой m относительно неподвижной точки O — физическая величина, равная произведению расстояния от материальной точки до точки O и перпендикулярной составляющей импульса (рис. 9). Момент импульса обозначается через L :

$$L = rp_{\perp} = rmv_{\perp} = rmv \sin \alpha,$$

где α — угол между направлением скорости и линией, соединяющей материальную точку массой m с точкой O .

Момент импульса — *вектор*. Если материальная точка движется по круговой траектории вокруг точки O , то направление вектора \vec{L} определяется по **правилу правого винта**: если винт вращать в направлении движения материальной точки, то его поступательное движение совпадет с направлением вектора момента импульса (рис. 10).

Момент импульса твердого тела относительно оси Z есть сумма моментов импульсов отдельных частиц относительно той же оси:

$$L = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i,$$

где r_i — расстояние от оси Z до отдельной частицы тела, $m_i v_i$ — импульс этой частицы.

Момент силы относительно неподвижной точки O

$$M = Fr \sin \alpha = Fl,$$

где α — угол между радиусом-вектором \vec{r} и силой F ; $r \sin \alpha = l$ — кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O — **плечо силы**.

МОЩНОСТЬ — физическая величина, характеризующая скорость совершения работы.

Средняя мощность за промежуток времени Δt — физическая величина, определяемая отношением работы силы к этому промежутку времени:

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta A}{\Delta t}.$$

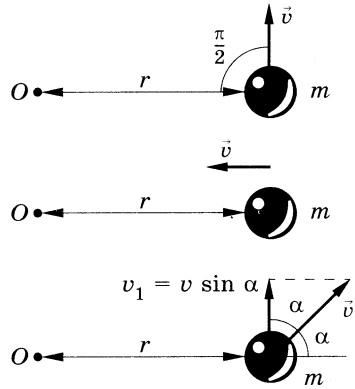


Рис. 9

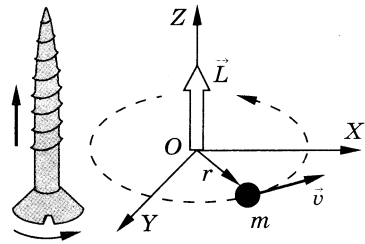


Рис. 10

Мгновенная мощность — физическая величина, определяемая первой производной работы по времени:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

За время dt сила \vec{F} совершает работу $\vec{F}d\vec{r}$, и мощность, развиваемая этой силой, в данный момент времени

$$N = \frac{F d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{v},$$

т. е. равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения этой силы. *Мощность — величина скалярная.*

Единица мощности — ватт (Вт): 1 Вт — мощность, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж (1 Вт = 1 Дж/с).

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА — системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета с ускорением.

НЬЮТОНА ЗАКОНЫ

Первый закон Ньютона (закон инерции): *материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не выведет ее (его) из этого состояния.*

Или

существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела.

Первый закон Ньютона утверждает существование инерциальных систем отсчета.

Второй закон Ньютона: *ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \text{ или } \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Более общая формулировка закона: *скорость изменения импульса материальной точки (тела) равна действующей на нее (него) силе:*

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}.$$

Третий закон Ньютона: *всякое действие материальных точек (тел) друг на друга имеет характер взаимодействия; силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:*

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

где \vec{F}_{12} — сила, действующая на первую материальную точку со стороны второй, \vec{F}_{21} — сила, действующая на вторую материальную точку со стороны первой. Эти силы приложены к разным материальным точкам (телам), всегда действуют парами и являются силами одной природы.

Третий закон Ньютона позволяет осуществить переход от динамики отдельной материальной точки к динамике системы материальных точек, для которой взаимодействие сводится к силам парного взаимодействия между отдельными материальными точками.

Законы Ньютона сформулированы в 1687 г., играют исключительную роль в механике и являются (как и все физические законы) обобщением результатов огромного человеческого опыта. Их рассматривают как систему взаимосвязанных законов и опытной проверке подвергают не каждый отдельный закон, а всю систему в целом.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ. Пусть в системе K в точках с координатами x_1 и x_2 в моменты времени t_1 и t_2 происходят два события. В системе K' , движущейся относительно системы K со скоростью \vec{v} , им соответствуют координаты x'_1 и x'_2 и моменты времени t'_1 и t'_2 . Если события в системе K происходят в одной точке ($x_1 = x_2$) и являются одновременными ($t_1 = t_2$), то, согласно преобразованиям Лоренца,

$$x'_1 = x'_2, \quad t'_1 = t'_2,$$

т. е. эти события являются одновременными и пространственно совпадающими для любой инерциальной системы отсчета.

Если события в системе K пространственно разобщены ($x_1 \neq x_2$), но одновременны ($t_1 = t_2$), то в системе K' , согласно преобразованиям Лоренца,

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$t'_1 = \frac{1 - vx_1/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad t'_2 = \frac{t - vx_2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$x'_1 \neq x'_2, \quad t'_1 \neq t'_2.$$

Таким образом, в системе K' эти события, оставаясь пространственно разобщенными, оказываются и неодновременными.

ПАСКАЛЯ ЗАКОН — основной закон гидростатики, описывающий давление при равновесии жидкостей (газов): *давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью.* На законе Паскаля основано, например, действие гидравлических прессов, подъемников, жидкостных манометров.

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА — физическая величина, определяемая массой единицы объема вещества:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Единица плотности — килограмм на кубический метр (кг/м^3): 1 кг/м^3 равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м^3 равна 1 кг .

ПОЛНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ — энергия механического движения и взаимодействия

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}},$$

равная сумме кинетической и потенциальной энергий.

Потенциальная энергия — механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Потенциальная энергия определяется с точностью до некоторой произвольной постоянной. Это не отражается на физических законах, так как в них входит или разность потенциальных энергий в двух положениях тела, или производная $E_{\text{п}}$ по координатам. Поэтому потенциальную энергию тела в каком-то определенном положении считают равной нулю (выбирают нулевой уровень отсчета), а энергию тела в других положениях отсчитывают относительно нулевого уровня. Так как начало отсчета выбирается произвольно, то потенциальная энергия, в отличие от кинетической, может иметь отрицательное значение.

Пусть взаимодействие тел осуществляется посредством силовых полей.

Поле, в котором работа, совершаемая действующими силами при перемещении тела из одного положения в другое, не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит только от начального и конечного положений тела, называется **потенциальным**. Потенциальными являются, например, поле упругих сил, поле гравитационных сил.

Консервативная сила — сила, работа которой при перемещении точки (тела) зависит только от начального и конечного положений точки (тела) в пространстве (на рис. 11 точки A и B соответственно).

Тело, находясь в потенциальном поле сил, обладает потенциальной энергией $E_{\text{п}}$. Работа консервативных сил при элементарном (бесконечно малом) изменении конфигурации системы равна приращению потенциальной энергии, взятому со знаком минус, так как работа совершается за счет убыли потенциальной энергии:

$$\Delta A = -\Delta E_{\text{п}}.$$

Конкретный вид функции $E_{\text{п}}$ зависит от характера силового

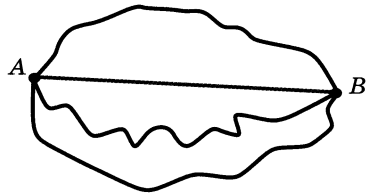


Рис. 11

поля. В качестве примеров рассмотрим потенциальную энергию тела в поле гравитационных и упругих сил.

1. *Потенциальная энергия тела массой m , поднятого на высоту h над поверхностью Земли,*

$$E_{\text{п}} = mgh,$$

где h отсчитывается от нулевого уровня, для которого $E_{\text{п}} = 0$. Это выражение вытекает непосредственно из того, что потенциальная энергия равна работе силы тяжести при падении тела с высоты h на поверхность Земли.

2. *Потенциальная энергия упругодеформированного тела*

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2},$$

т. е. равна работе силы упругости при переходе упругодеформированного тела в положение, в котором его деформация равна нулю.

ПРИНЦИП НЕЗАВИСИМОСТИ ДЕЙСТВИЯ СИЛ: если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает материальной точке ускорение согласно второму закону Ньютона, как будто другие силы отсутствуют. Силы и ускорения можно разлагать на составляющие, использование которых приводит к существенному упрощению решения задач. На рис. 12, например, действующая сила $\vec{F} = m\vec{a}$ разложена на два компонента: **тангенциальную силу \vec{F}_{τ}** (направлена по касательной к траектории) и **нормальную силу \vec{F}_n** (направлена по нормали к центру кривизны). Используя выражения $a_{\tau} = \frac{dv}{dt}$ и $a_n = \frac{v^2}{R}$, можно записать:

$$F_{\tau} = ma_{\tau} = m \frac{dv}{dt};$$

$$F_n = ma_n = \frac{mv^2}{R}.$$

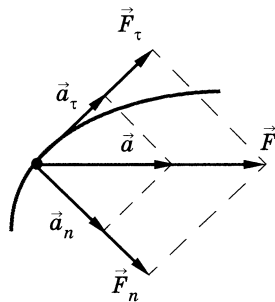


Рис. 12

Если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то, согласно принципу независимости действия сил, под силой \vec{F} во втором законе Ньютона понимают *результатирующую силу*.

РАБОТА СИЛЫ — количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами.

Если тело движется *прямолинейно* и на него действует постоянная сила \vec{F} , которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения, то работа этой силы равна произведению проекции силы F_s на направление перемещения ($F_s = F \cos \alpha$), умноженной на перемещение точки приложения силы:

$$A = F_s s = F s \cos \alpha. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что при $\alpha < \pi/2$ работа силы положительна, в этом случае составляющая F_s совпадает по направлению с вектором скорости движения \vec{v} . Если $\alpha > \pi/2$, то работа силы отрицательна. При $\alpha = \pi/2$ (сила направлена перпендикулярно перемещению) работа силы равна нулю.

В общем случае сила может изменяться как по модулю, так и по направлению, поэтому формулой (1) пользоваться нельзя. Если, однако, рассмотреть элементарное перемещение $d\vec{r}$, то силу \vec{F} можно считать постоянной, а движение точки ее приложения — прямолинейным. **Элементарная работа** силы \vec{F} на перемещении $d\vec{r}$

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = F \cos \alpha ds = F_s ds,$$

где α — угол между векторами \vec{F} и $d\vec{r}$; $ds = |d\vec{r}|$ — элементарный путь; F_s — проекция вектора \vec{F} на вектор $d\vec{r}$ (рис. 13). Работа — *скалярная* величина.

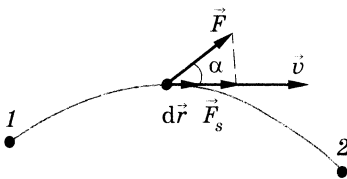


Рис. 13

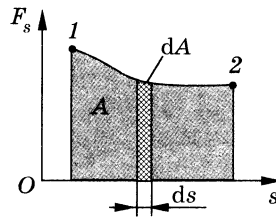


Рис. 14

Работа, совершаемая переменной силой F_s на пути s вдоль траектории 1—2, численно равна площади закрашенной на рис. 14 фигуры.

Единица работы — джоуль (Дж): 1 Дж — работа, совершаемая силой 1 Н на пути 1 м (1 Дж = 1 Н · м).

РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ. Работа силы тяжести при свободном падении тела с высоты h_1 (начало отсчета) до высоты h_2 (рис. 15)

$$A = mg(h_1 - h_2),$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения. Работа силы тяжести зависит только от начального и конечного положений тела (т. е. поле тяготения потенциально) и вдоль замкнутой траектории равна нулю.

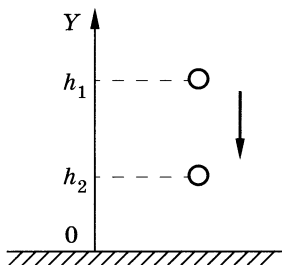


Рис. 15

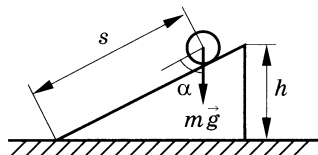


Рис. 16

Если тело падает с высоты h до нулевого уровня, то работа силы тяжести

$$A = mgh,$$

если же оно брошено по вертикали вверх на высоту h с нулевого уровня, то

$$A = -mgh.$$

Если тело движется по наклонной плоскости (рис. 16), то работа силы тяжести $A = mgs \cos \alpha$, где $s \cos \alpha = h$, поэтому

$$A = mgh.$$

РАБОТА СИЛЫ УПРУГОСТИ. В качестве примера рассмотрим работу силы упругости *пружины* (рис. 17). Работа силы упругости пружины

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2},$$

где k — жесткость пружины, x_1 и x_2 — соответственно координаты начального и конечного положений пружины. Эта формула справедлива и для других деформированных тел. Работа силы упругости определяется только начальной и конечной координатой, т. е. поле упругих сил потенциально.

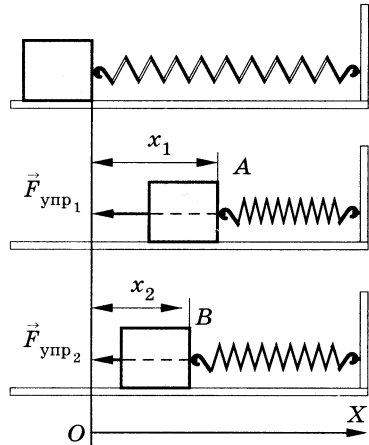


Рис. 17

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором материальная точка за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ — движение, при котором материальная точка (тело) за равные промежутки времени проходит равные по длине дуги окружности. Это движение — *частный случай криволинейного движения*. В любой точке траектории скорость \vec{v} направлена по касательной к окружности, а модуль скорости точки с течением времени не изменяется: $v = \text{const}$ (рис. 18).

Тангенциальная составляющая ускорения при равномерном движении точки по окружности

$$a_\tau = 0,$$

а нормальная составляющая ускорения

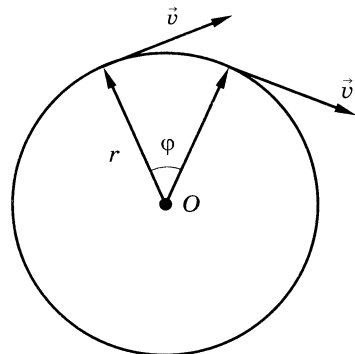


Рис. 18

(центростремительное ускорение)

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

направлена по радиусу к центру окружности. Вектор нормального ускорения в любой точке окружности *перпендикулярен* вектору скорости (рис. 19). Ускорение материальной точки, равномерно движущейся по окружности, всегда *центростремительное*.

Период вращения T — время, за которое точка совершает один полный оборот по окружности, т. е. поворачивается на угол 2π .

Частота вращения — число полных оборотов, совершаемых точкой при равномерном ее движении по окружности, в единицу времени:

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

Единица частоты — секунда в минус 1-й степени (с^{-1}): 1 с^{-1} равна частоте вращения, при которой материальная точка, равномерно вращаясь, за время 1 с совершает 1 оборот.

Поскольку за время, равное периоду T , точка проходит путь, равный длине окружности $2\pi r$, то

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

Подставив это выражение в формулу для a_n , получим

$$a_n = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = 4\pi^2 n^2 r.$$

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение с постоянной по модулю ($v = \text{const}$) и по направлению ($\vec{v} = \text{const}$) скоростью.

Скорость равномерного прямолинейного движения

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

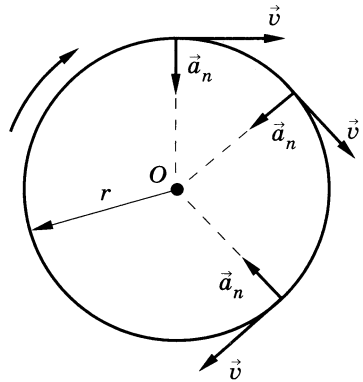


Рис. 19

совпадает по направлению с вектором перемещения и в каждой точке траектории направлена вдоль траектории (при прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории).

График скорости $v = v(t)$ при равномерном движении задается прямой линией, параллельной оси времени (рис. 20, а).

Предположим, что материальная точка движется равномерно вдоль оси OX . Проекция перемещения на ось в данном случае равна:

$$x - x_0 = v_x t,$$

и кинематическое уравнение равномерного движения материальной точки вдоль оси X имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t,$$

где x , x_0 — соответственно координаты точки в данный (t) и начальный ($t = 0$) моменты времени, v_x — проекция вектора скорости \vec{v} на ось OX . Графики зависимости координат точки от времени для двух случаев ($x_0 = 0, v_x > 0$ и $x_0 \neq 0, v_x > 0$) приведены на рис. 20, б, в.

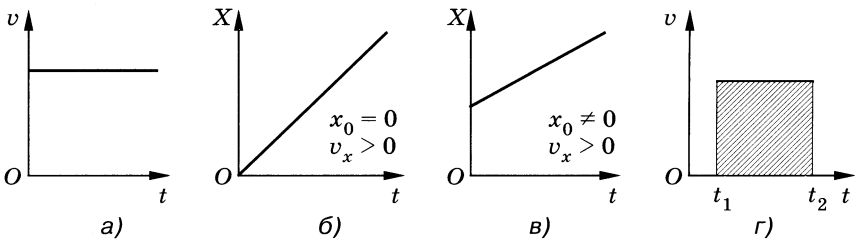


Рис. 20

По графику скорости (рис. 20, г) можно определить пройденный материальной точкой путь за промежуток времени от t_1 до t_2 : он определяется площадью заштрихованного на рисунке прямоугольника.

РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором скорость материальной точки за любые равные промежутки времени изменяется на равные величины, иными словами, движение с постоянным по модулю ($a = \text{const}$) и по

направлению ($\vec{a} = \text{const}$) ускорением. Ускорение \vec{a} направлено вдоль траектории движущейся точки.

Если направление ускорения \vec{a} *совпадает* с направлением скорости \vec{v} точки, то движение **равноускоренное** (в данном случае модуль скорости с течением времени увеличивается), если же направления векторов \vec{a} и \vec{v} *противоположны*, то движение **равнозамедленное** (модуль скорости со временем уменьшается).

За промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ скорость изменяется на $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ или $\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}(t - t_0)$. При $t_0 = 0$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

или проекция вектора скорости на ось OX :

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

График зависимости скорости от времени $v_x(t)$ приведен на рис. 21, а.

Путь, пройденный точкой за время t при равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью \vec{v}_0 и ускорением \vec{a} ,

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

При $v_0 = 0$ пройденный путь

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

График этой зависимости приведен на рис. 21, б.

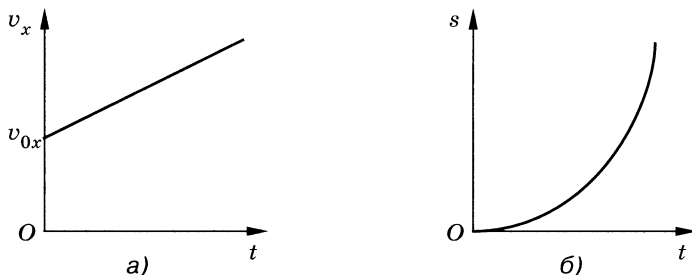
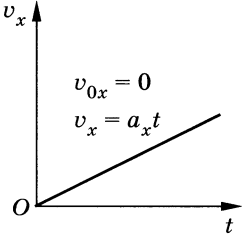
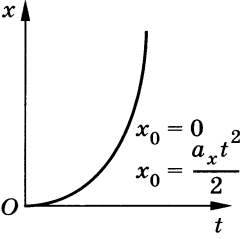
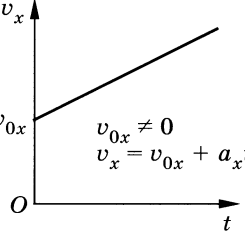
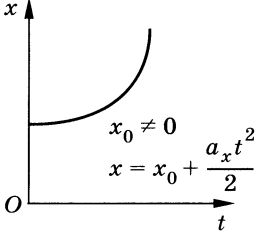
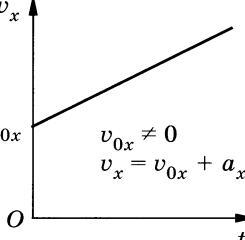
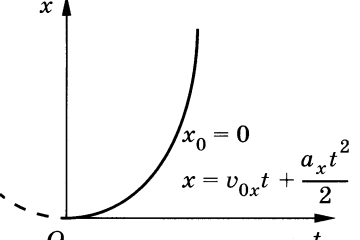
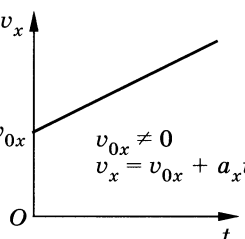
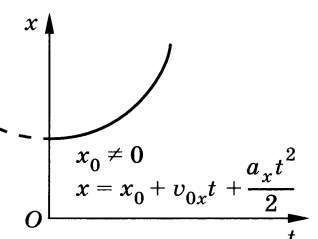


Рис. 21

РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ, ГРАФИКИ

Проекция скорости на ось OX	Координата
$v_x = v_{0x} + a_x t$	$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$
 <p> $v_{0x} = 0$ $v_x = a_x t$ </p>	 <p> $x_0 = 0$ $x_0 = \frac{a_x t^2}{2}$ </p>
 <p> $v_{0x} \neq 0$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ </p>	 <p> $x_0 \neq 0$ $x = x_0 + \frac{a_x t^2}{2}$ </p>
 <p> $v_{0x} \neq 0$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ </p>	 <p> $x_0 = 0$ $x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ </p>
 <p> $v_{0x} \neq 0$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ </p>	 <p> $x_0 \neq 0$ $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ </p>

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА — динамика, основанная на постулатах специальной теории относительности: законы природы инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. В ней рассматриваются взаимодействия тел при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Релятивистский импульс рассчитывается по формуле

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m — масса частицы.

Основной закон релятивистской динамики:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

Уравнение в таком виде, где справа стоит производная от релятивистского импульса, удовлетворяет первому постулату Эйнштейна.

Полная энергия релятивистской частицы

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

различна в разных инерциальных системах отсчета. Уравнение (1) выражает *фундаментальный закон природы* — **закон взаимосвязи массы и энергии**.

Если тело *неподвижно*, то его энергия

$$E_0 = mc^2,$$

где E_0 — **энергия покоя**. В классической механике энергия покоя не учитывается, считается, что при $v = 0$ энергия покоящегося тела равна нулю.

Полная энергия в релятивистской динамике — это сумма кинетической энергии и энергии покоя тела (частицы). Тогда кинетическая энергия

$$E_k = E - E_0 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ. Пусть тело движется вдоль оси X' системы K' со скоростью \vec{v}_1 (рис. 22). В свою очередь система K' движется относительно системы K со скоростью \vec{v} . Оси X и X' совпадают, а оси Y и Y' , Z и Z' параллельны. Тогда **релятивистский закон сложения скоростей:**

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + v_1 v / c^2},$$

где v_1 — скорость тела относительно системы K' , v_2 — скорость этого же тела относительно системы K . Релятивистский закон сложения скоростей подчиняется второму постулату Эйнштейна.

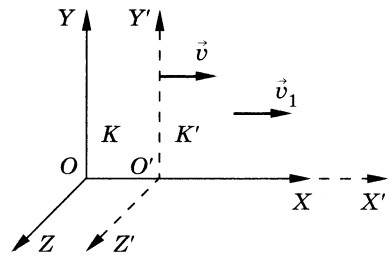


Рис. 22

Если световой импульс в системе K' движется вдоль оси X' со скоростью $\vec{v}_1 = c$, то в системе отсчета K $v_2 = c$. Таким образом, при сложении любых скоростей результат не может превысить скорости света c в вакууме. *Скорость света в вакууме есть предельная скорость.* Если же скорости v и v_1 малы по сравнению со скоростью c ($v \ll c$ и $v_1 \ll c$), то релятивистский закон сложения скоростей в предельном случае для малых скоростей переходит в закон сложения скоростей в классической механике.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ — движение без начальной скорости, которое совершало бы тело под действием только силы тяжести без учета сопротивления воздуха. Свободное падение — равноускоренное движение с ускорением свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, направленным вертикально вниз.

Основные формулы для такого движения:

скорость тела в произвольный момент времени t : $\vec{v} = \vec{g}t$;

путь, пройденный телом в свободном падении: $h = \frac{gt^2}{2}$;

модуль скорости тела при свободном падении с высоты h :

$$v = \sqrt{2gh};$$

время свободного падения с высоты h : $t = \sqrt{2h/g}$.

СИЛА. Для описания воздействий тел друг на друга вводят понятие силы. Под действием сил тела либо изменяют скорость движения, т. е. приобретают ускорения (динамическое проявление сил), либо деформируются, т. е. изменяют свою форму и размеры (статическое проявление сил). В каждый момент времени сила характеризуется числовым значением, направлением в пространстве и точкой приложения. Итак, **сила** — векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры.

Единица силы — **ньютон (Н)**: 1 Н равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

СИЛА НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ — составляющая силы, действующая со стороны тела на опору и направленная по нормали к поверхности соприкосновения. Естественно, что при скольжении тела по горизонтальной поверхности сила нормального давления равна весу тела. Сила нормального давления по модулю равна силе реакции опоры.

СИЛА РЕАКЦИИ ОПОРЫ — сила \vec{N} , действующая на данное тело со стороны опоры перпендикулярно к его поверхности. Сила реакции опоры по модулю равна силе нормального давления.

СИЛА ТЯЖЕСТИ — сила, которая действует на любое тело, находящееся вблизи земной поверхности, и направлена вертикально вниз:

$$\vec{F}_T = m\vec{g},$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения. Сила тяжести — одно из проявлений гравитационной силы (силы тяготения), а именно это есть сила притяжения тела к Земле.

Если пренебречь суточным вращением Земли вокруг своей оси, то сила тяжести и сила тяготения равны между собой:

$$F_{\text{т}} = mg = F = \frac{GmM}{R_0^2},$$

где M — масса Земли; R_0 — расстояние между телом и центром Земли. Эта формула дана для случая, когда тело находится на поверхности Земли.

Если тело расположено на высоте h от поверхности Земли, тогда

$$F_{\text{т}} = \frac{GmM}{(R_0 + h)^2},$$

т. е. сила тяжести с удалением от поверхности Земли уменьшается.

СИЛЫ ТРЕНИЯ — силы, возникающие при соприкосновении тел и препятствующие их относительному перемещению. Таким образом, силы трения направлены по касательной к поверхности соприкосновения тел противоположно относительной скорости их перемещения.

Силы трения могут быть разной природы, но в результате их действия механическая энергия всегда превращается во внутреннюю энергию соприкасающихся тел.

Сила, возникающая на границе соприкосновения тел при отсутствии их относительного движения, называется **силой трения покоя**. Сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к покоящемуся телу параллельно поверхности соприкасающихся тел.

Относительное движение тел возникает, если внешняя сила $F > (F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$, где $(F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$ — **максимальная сила трения покоя**:

$$(F_{\text{тр0}})_{\text{max}} = \mu_0 N,$$

где μ_0 — безразмерный коэффициент трения покоя, N — сила нормального давления. Следовательно, максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормального давления.

Если $F > (F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$, то тело получает ускорение и начинает скользить по поверхности другого тела. В данном случае также действует сила трения, но уже другая, и она называется **силой трения скольжения**. Направление силы трения скольжения противоположно направлению движения тела, она пропорциональна силе нормального давления (а значит, и силе реакции опоры) (рис. 23):

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ — безразмерный коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Радикальным способом уменьшения силы трения является замена трения скольжения трением качения (шариковые и роликовые подшипники и т. д.). **Сила трения качения** определяется по закону:

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{к}} \frac{N}{r},$$

где r — радиус катящегося тела; $f_{\text{к}}$ — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины. Таким образом, сила трения качения обратно пропорциональна радиусу катящегося тела.

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

СИСТЕМА ОТСЧЕТА — совокупность системы координат и синхронизированных между собой часов, связанных с телом отсчета, относительно которого изучается движение тел.

В декартовой системе координат, используемой наиболее часто, положение точки A в данный момент времени по отношению к этой системе характеризуется тремя координатами x , y и z или

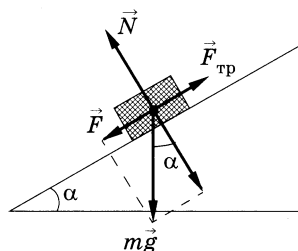


Рис. 23

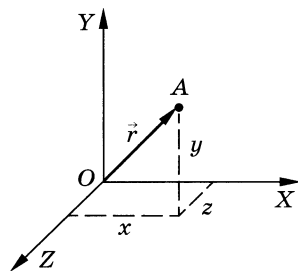


Рис. 24

радиусом-вектором \vec{r} , проведенным из начала системы координат в данную точку (рис. 24).

При движении материальной точки ее координаты с течением времени изменяются. В общем случае ее движение определяется скалярными уравнениями

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t), \quad (1)$$

эквивалентными векторному уравнению

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (2)$$

Уравнения (1) и соответственно (2) называются **кинематическими уравнениями движения материальной точки**.

СКОРОСТЬ — векторная величина, которая определяет как *быстроту* движения, так и его *направление* в данный момент времени.

Пусть материальная точка движется по какой-либо криволинейной траектории так, что в момент времени t ей соответствует радиус-вектор \vec{r}_0 (рис. 25). В течение малого промежутка времени Δt точка пройдет путь Δs и получит элементарное (бесконечно малое) перемещение $\Delta \vec{r}$.

Средняя скорость — векторная величина, равная отношению приращения $\Delta \vec{r}$ радиуса-вектора точки к промежутку времени Δt :

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ (см. рис. 25).

При неограниченном уменьшении Δt средняя скорость стремится к предельному значению, которое называется **мгновенной скоростью** \vec{v} :

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

Мгновенная скорость — векторная величина, определяемая первой производной радиуса-вектора движущейся точки по времени. Она направлена по касательной к траектории в сторону движения (см. рис. 25).

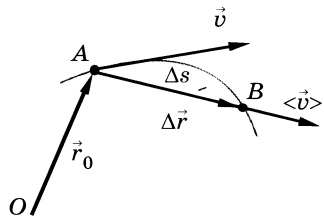


Рис. 25

Единица скорости — метр в секунду (м/с): 1 м/с равен скорости равномерного и прямолинейного движения, при котором точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Модуль средней скорости

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}; \quad \langle v \rangle = |\langle \vec{v} \rangle| = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Модуль мгновенной скорости

$$v = \frac{ds}{dt}; \quad v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

Проекции скорости точки на оси координат:

$$v_x = \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v_z = \frac{dz}{dt}.$$

В случае движения в одной плоскости, вектор \vec{v} может быть представлен в виде суммы векторов \vec{v}_x и \vec{v}_y , направленных вдоль координатных осей. Из рис. 26 следует, что

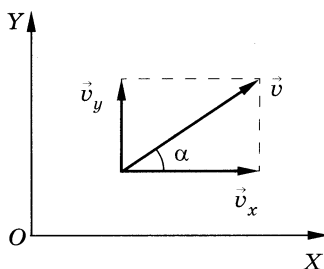


Рис. 26

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y; \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad v_x = v \cos \alpha; \quad v_y = v \sin \alpha; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}.$$

СЛЕДСТВИЯ ИЗ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Манометры — приборы для измерения давления жидкостей и газов.

Из уравнения Бернулли для горизонтальной трубки тока

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$

и уравнения неразрывности $Sv = \text{const}$ следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах, т. е. там, где скорость меньше. Это можно

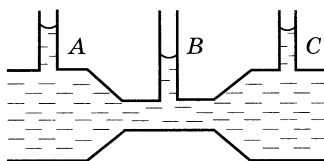


Рис. 27

продемонстрировать, установив вдоль трубы ряд **манометров** (рис. 27). Опыт показывает, что в манометрической трубке *B*, прикрепленной к узкой части трубы, уровень жидкости ниже, чем в манометрических трубках *A* и *C*, прикрепленных к широкой части трубы.

Водоструйный насос. Уменьшение статического давления в точках, где скорость потока больше, положено в основу работы **водоструйного насоса** (рис. 28). Струя воды подается в трубку, открытую в атмосферу, так, что давление на выходе из трубки равно атмосферному. В трубке имеется сужение, в этом месте давление меньше атмосферного. Это давление устанавливается и в откачиваемом сосуде. Воздух из откачиваемого сосуда увлекается вытекающей с большой скоростью водой из узкого конца и удаляется вместе с водой.

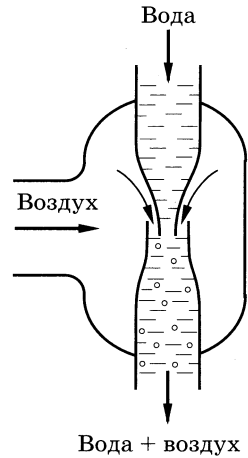


Рис. 28

Измерение скорости потока жидкости (газа)

Трубка Пито — Прандтля (рис. 29) состоит из двух изогнутых под прямым углом трубок, противоположные концы которых присоединены к манометру. С помощью одной из трубок измеряется *полное давление* (p_0), с помощью другой — *статическое* (p). Манометром измеряется разность давлений: $p_0 - p = \rho_0 g h$, где ρ_0 — плотность жидкости в манометре. С дру-

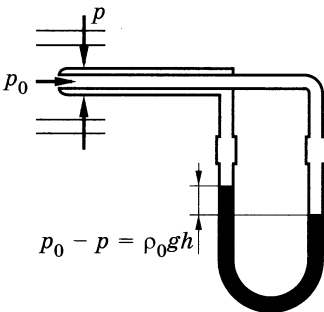


Рис. 29

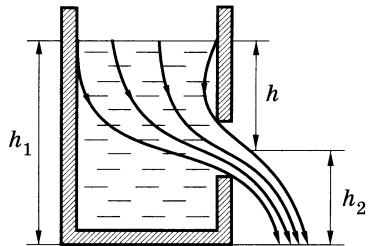


Рис. 30

гой стороны, согласно уравнению Бернулли, разность давлений равна динамическому давлению: $p_0 - p = \rho v^2/2$. Из этих формул искомая скорость жидкости потока $v = \sqrt{2\rho_0gh/\rho}$.

Торричелли формула. Найдем скорость истечения жидкости через малое отверстие в стенке сосуда (рис. 30). Уравнение Бернулли для двух сечений (на уровне h_1 свободной поверхности жидкости в сосуде и на уровне h_2 выхода ее из отверстия):

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2,$$

$p_1 = p_2$ (атмосферное давление).

Тогда

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2,$$

$S_1v_1 = S_2v_2$ (уравнение неразрывности). Если $S_1 \gg S_2$, то членом v_1^2 можно пренебречь и $v_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh$, откуда $v_2 = \sqrt{2gh}$ — это и есть **формула Торричелли**.

ТВЕРДОЕ ТЕЛО, ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, перпендикулярной к плоскостям окружностей и называемой **осью вращения** (рис. 31).

Различные точки твердого тела движутся по-разному, поэтому его вращательное движение нельзя охарактеризовать движением какой-то одной точки.

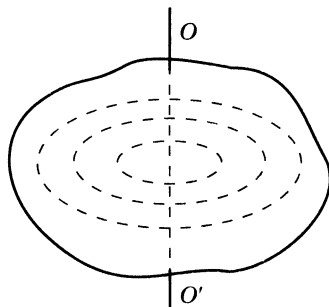


Рис. 31

ТВЕРДОЕ ТЕЛО, ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению

(рис. 32). Поступательно, например, движется кабина лифта или кабина колеса обозрения.

При поступательном движении *все точки тела движутся одинаково*, и его движение задается и изучается так же, как и движение какой-то произвольной его точки (например, движение центра масс тела).

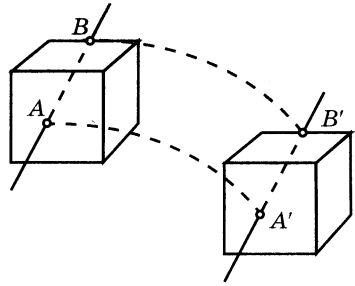


Рис. 32

ТЕЛО ОТСЧЕТА — произвольное тело, условно принимаемое за неподвижное, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел. С телом отсчета связывают начало координат системы отсчета. Поскольку положение любого движущегося тела определяется по отношению к телу отсчета, поэтому механическое движение *относительно*.

ТЕОРЕМА О КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: *работа равнодействующей сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела:*

$$A = E_{к2} - E_{к1},$$

где $E_{к2}$, $E_{к1}$ — кинетическая энергия тела соответственно в конечном и начальном положениях.

Из теоремы о кинетической энергии следует, что работа любых сил есть мера изменения кинетической энергии тела. Приращение кинетической энергии на элементарном перемещении равно элементарной работе на том же перемещении:

$$\Delta E_{к} = \Delta A,$$

а приращение кинетической энергии на участке траектории 1—2

$$E_{к2} - E_{к1} = A_{12}.$$

Если работа сил на данном участке траектории положительна ($A_{12} > 0$), то кинетическая энергия тела возрастает ($E_{к2} > E_{к1}$), если же работа сил отрицательна ($A_{12} < 0$), то кинетическая энергия тела уменьшается ($E_{к2} < E_{к1}$).

ТРАЕКТОРИЯ — непрерывная линия, описываемая движущейся материальной точкой относительно выбранной системы отсчета. В зависимости от формы траектории различают:

прямолинейное движение — траектория движения в данной системе отсчета — прямая линия;

криволинейное движение — траектория движения в данной системе отсчета — некоторая кривая.

Форма траектории зависит от начальных условий и сил, действующих на материальную точку, а также от того, относительно какой системы отсчета рассматривается движение (*траектории движения одного и того же тела в разных системах отсчета различны*). Так, тело, опущенное с небольшой высоты без начальной скорости, относительно Земли движется прямолинейно; тело же, брошенное горизонтально, будет двигаться по параболе, т. е. криволинейно. С другой стороны, если наблюдать след от капель дождя в покоящемся вагоне, то можно увидеть на стекле прямые линии, а в движущемся вагоне — косые.

ТРЕНИЕ. Различают внешнее (сухое) и внутреннее (жидкое или вязкое) трение. **Внешним трением** называется трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся твердых тел при их относительном перемещении. Если соприкасающиеся тела неподвижны друг относительно друга, говорят о **трении покоя**, если же происходит относительное перемещение этих тел, то в зависимости от характера их относительного движения говорят о **трении скольжения, качения или верчения**.

Внутренним трением называется трение между частями одного и того же тела, например между различными слоями жидкости или газа, скорости которых меняются от слоя к слою. В отличие от внешнего трения здесь отсутствует трение покоя. Если тела скользят относительно друг друга и разделены прослойкой вязкой жидкости (смазки), то трение происходит в слое смазки. В таком случае говорят о **гидродинамическом трении** (слой смазки достаточно толстый) и **граничном трении** (толщина смазочной прослойки $\approx 0,1$ мкм и меньше).

Трение играет большую роль в природе и технике. Благодаря трению движется транспорт, удерживается забитый в стену гвоздь и т. д.

В некоторых случаях силы трения оказывают вредное действие и поэтому их надо уменьшать. Для этого на трущиеся поверхности наносят смазку (сила трения уменьшается примерно в 10 раз), которая заполняет неровности между этими поверхностями и располагается тонким слоем между ними так, что поверхности как бы перестают касаться друг друга, а скользят друг относительно друга отдельные слои жидкости. Таким образом, внешнее трение твердых тел заменяется значительно меньшим внутренним трением жидкости.

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ — такое движение жидкости, при котором вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа). Турбулентное течение называется также вихревым.

При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.

УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ. Совокупность частиц движущейся жидкости называется **потоком**. Графически движение жидкостей изображается с помощью **линий тока**, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с вектором скорости жидкости в соответствующих точках пространства (рис. 33). Линии тока проводятся так, чтобы густота их, характеризуемая отношением числа линий к площади перпендикулярной им площадки, через которую они проходят, была больше там, где больше скорость течения жидкости, и меньше там, где жидкость

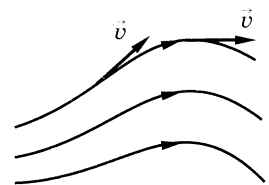


Рис. 33

течет медленнее. Таким образом, по картине линий тока можно судить о направлении и модуле скорости в разных точках пространства, т. е. можно определить состояние движения жидкости. Линии тока в жидкости можно «проявить», например, подмешав в нее какие-либо заметные взвешенные частицы.

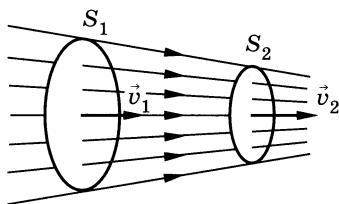


Рис. 34

Часть жидкости, ограниченную линиями тока, называют **трубкой тока**. Течение жидкости называется **установившимся** (или **стационарным**), если форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются.

Рассмотрим трубку тока (рис. 34) с двумя сечениями S_1 и S_2 , перпендикулярными скоростям течения жидкости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 в месте сечений. За 1 с через сечение S_1 пройдет объем жидкости $S_1 v_1$, через сечение S_2 — $S_2 v_2$. Если жидкость несжимаема ($\rho = \text{const}$), а скорость жидкости в сечении постоянна, то через сечение S_2 пройдет такой же объем жидкости, как и через сечение S_1 , т. е. $S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const}$.

В общем случае можно записать

$$Sv = \text{const},$$

т. е. *произведение скорости течения несжимаемой жидкости на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная для данной трубки тока*. Это уравнение называется **уравнением неразрывности** для несжимаемой жидкости.

УСКОРЕНИЕ — характеристика неравномерного движения, определяет быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Среднее ускорение неравномерного движения за промежуток времени Δt — векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение — векторная величина, определяемая первой производной скорости по времени:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с^2): 1 м/с^2 равен ускорению прямолинейного ускоренного движения точки, при котором за 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с .

Ускорение при криволинейном движении может быть разложено на две составляющие:

тангенциальную $a_\tau = \frac{dv}{dt}$ — характеризует быстроту изменения скорости *по модулю* (направлена по касательной к траектории, рис. 35);

нормальную $a_n = \frac{v^2}{r}$ — характеризует быстроту изменения скорости *по направлению* (направлена к центру кривизны траектории (см. рис. 35); r — радиус кривизны траектории в данной точке). Из рис. 35 следует, что

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

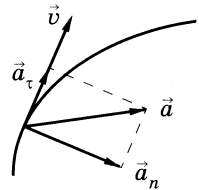


Рис. 35

Классификация движения в зависимости от тангенциальной и нормальной составляющих ускорения

a_τ	a_n	Движение
0	0	Прямолинейное равномерное
$a_\tau = a = \text{const}$	0	Прямолинейное равнопеременное
$a_\tau = f(t)$	0	Прямолинейное с переменным ускорением
0	const	Равномерное по окружности
0	$\neq 0$	Криволинейное равномерное
const	$\neq 0$	Криволинейное равнопеременное
$a_\tau = f(t)$	$\neq 0$	Криволинейное с переменным ускорением

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ — ускорение, приобретаемое материальной точкой под действием силы тяжести.

Согласно фундаментальному физическому закону — **обобщенному закону Галилея**, *все тела в одном и том же поле тяготения падают с одинаковым ускорением*. Следовательно, в данном месте Земли ускорение свободного падения одинаково для всех тел. Оно изменяется вблизи поверхности Земли в зависимости от широты в пределах от $9,780 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,832 \text{ м/с}^2$ на полюсах. Это обусловлено суточным вращением Земли вокруг своей оси, с одной стороны, и сплюснутостью Земли — с другой (экваториальный и полярный радиусы Земли равны соответственно 6378 и 6357 км). Так как различие значений g невелико, ускорение свободного падения, которое используется при решении практических задач, принимается равным $9,81 \text{ м/с}^2$.

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ — *абстрактные понятия*, которые используются для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач.

Материальная точка — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, что облегчает решение практических задач (например, движущиеся вокруг Солнца планеты при расчетах можно рассматривать как материальные точки).

Абсолютно твердое тело (твердое тело) — тело, которое ни при каких условиях не может деформироваться, и при всех условиях расстояние между двумя точками (или точнее между двумя частицами) этого тела остается постоянным.

Абсолютно упругое тело — тело, деформация которого подчиняется закону Гука, а после прекращения действия внешних сил принимает свои первоначальные размеры и форму.

Абсолютно неупругое тело — тело, полностью сохраняющее деформированное состояние после прекращения действия внешних сил.

ЦЕНТР МАСС (ЦЕНТР ИНЕРЦИИ) — воображаемая точка C , положение которой характеризует распределение масс в теле или

системе материальных точек. В последнем случае радиус-вектор центра масс

$$\vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{m},$$

где m_i и \vec{r}_i — соответственно масса и радиус-вектор i -й материальной точки, n — число материальных точек в системе,

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \text{ — масса системы.}$$

Понятие о центре масс отличается от понятия центра тяжести тем, что центр масс не связан ни с каким силовым полем и имеет смысл для любой механической системы, в то время как центр тяжести имеет смысл для твердого тела, находящегося в однородном поле тяготения.

При движении механической системы *центр масс системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, приложенных к системе.* Таким образом, центр масс — точка, в которой считается сосредоточенной вся масса тела или системы материальных точек при поступательном движении.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ — точка, связанная с твердым телом, через которую проходит равнодействующая всех сил тяжести, приложенных к отдельным малым объемам тела при любом его положении в пространстве. Понятие о центре тяжести имеет смысл только для твердого тела, находящегося в однородном поле тяготения, и этим отличается от понятия центра масс, не связанного ни с каким силовым полем и имеющего смысл для любой механической системы. В однородном поле тяготения центр тяжести и центр масс твердого тела совпадают. Центр тяжести может не совпадать ни с одной из точек данного тела (например, у тонкостенного обруча). Если тело подвесить на нити, прикрепленной к различным точкам тела, то направления нитей пересекутся в центре тяжести тела.

ЭНЕРГИЯ — универсальная количественная мера различных форм движения и взаимодействия. С различными формами движения материи связывают различные формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную и др. В одних явлениях форма движения материи не изменяется (например, горячее тело нагревает холодное), в других — переходит в иную форму (например, в результате трения механическое движение превращается в тепловое). Однако существенно, что во всех случаях энергия, отданная (в той или иной форме) одним телом другому телу, равна энергии, полученной последним телом.

Единица энергии — джоуль (Дж) (см. Работа силы).

В механике различают кинетическую и потенциальную энергию.

ЭЙНШТЕЙНА ПОСТУЛАТЫ лежат в основе специальной теории относительности (СТО) — физического учения о пространственно-временных закономерностях в связи с законами совершающихся в них физических явлений. СТО применима только к инерциальным системам отсчета.

Первый постулат Эйнштейна (принцип относительности): *все законы природы инвариантны (неизменны) во всех инерциальных системах отсчета.*

Первый постулат Эйнштейна, являясь обобщением механического принципа относительности Галилея на любые физические процессы, утверждает, таким образом, что физические законы инвариантны по отношению к выбору инерциальной системы отсчета, а уравнения, описывающие эти законы, одинаковы по форме во всех инерциальных системах отсчета. Согласно этому постулату, все инерциальные системы отсчета совершенно равноправны, т. е. явления (механические, электродинамические, оптические и др.) во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково.

Второй постулат Эйнштейна (принцип постоянства скорости света): *скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.*

Второй постулат утверждает, что *постоянство скорости света — фундаментальное свойство природы.* Если все дру-

гие скорости изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, то *скорость света в вакууме* — величина инвариантная (неизменная).

Из постулатов СТО следует, что скорость света c в вакууме — максимально возможная (предельная) скорость. Описываемые СТО явления (они получили название **релятивистских явлений**) наблюдаются при скоростях движения тел, *сравнимых* со скоростью распространения света в вакууме. СТО потребовала отказа от привычных представлений о пространстве и времени, принятых в классической механике, поскольку они противоречили принципу постоянства скорости света. Потеряло смысл не только абсолютное пространство, но и абсолютное время.

Постулаты Эйнштейна и теория, построенная на их основе, установили новый взгляд на мир и новые пространственно-временные представления, такие, например, как *относительность длин и промежутков времени, относительность одновременности событий*. Эти и другие следствия из теории Эйнштейна находят надежное экспериментальное подтверждение, являясь тем самым обоснованием постулатов Эйнштейна — обоснованием специальной теории относительности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Механика	7
Молекулярная физика и термодинамика	58
Электродинамика	115
Колебания и волны	174
Оптика	204
Квантовая физика	238
Предметный указатель	278