

Глава 2. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ И СИЛЫ

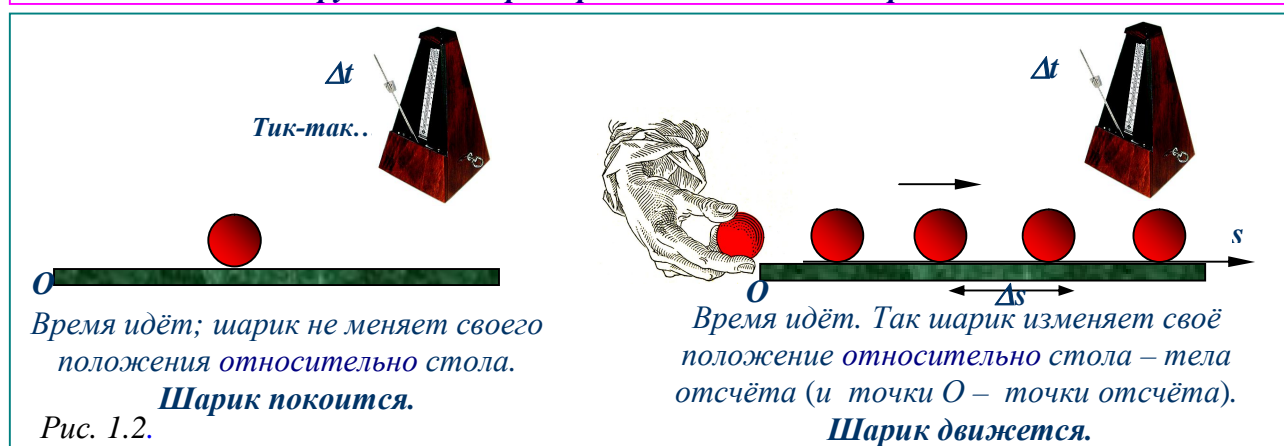
§13. Механическое движение.

Механическое движение на первый взгляд кажется совсем простым явлением. Кто не наблюдал движение автомобиля, самолета, пешехода! Но если спросить, движется ли здание, в котором вы находитесь, вы, наверное, ответите, что нет. А движется ли автомобиль, в котором вы сидите? В этом случае, по-видимому, ответ будет утвердительный. Чтобы понять, верны ли эти ответы, разберёмся в том, что такое механическое движение.

§13.1. Что такое механическое движение?

Начнём с анализа его определения.

Механическим движением называется изменение положения тела относительно других тел в пространстве с течением времени.



Во-первых, слова «*изменение положения тела относительно других тел*» означают, что факт движения тела можно установить, лишь *сравнивая его положение в последовательные моменты времени с положением другого тела* (или тел). Такое тело принято называть *телом отсчёта*. Однако это тело может быть слишком большим. Поэтому обычно целесообразно на нём выбрать *точку отсчёта O* и от неё непосредственно вести отсчёт положения тела, *рис. 1.2*.

Таким образом, можно говорить о положении наблюдаемого тела лишь *относительного* другого тела – *тела отсчёта*.

Во-вторых, в определении механического движения говорится, что оно происходит «*в пространстве с течением времени*». Так, на *рис. 1.2* показаны положения шарика *через равные промежутки времени Δt* , которые отсчитывает метроном. На *рис. 2.2* изображен приземляющийся самолёт, сфотографированный тоже *через определённые равные промежутки времени Δt* (такие снимки называются *стробоскопическими*). Используя такие изображения, можно не только утверждать, что тело движется, но и судить о скорости его движения. При этом мы должны *измерять* не только пройденные *расстояния Δs* , но и *промежутки времени Δt* .



Рис.2.2. Самолёт движется или нет? Почему?

Таким образом, для изучения движения необходимо отсчитывать не только *расстояния*, но и *временя*.

Утверждая, что здание покоится, мы имеем в виду Землю в качестве тела отсчёта: здание стоит на Земле. Но автомобиль, в котором вы едите, изменяет своё положение относительно Земли, деревьев, домов. Это вы видите в окна автомобиля. Поэтому вы считаете, что он движется. Ну а если бы окон не было, а автомобиль

равномерно и бесшумно двигался бы по гладкому шоссе? Вы вполне могли бы усомниться в движении. Во всяком случае, кошка, уютно устроившаяся у вас на коленях, покоится относительно вас и автомобиля и чувствует себя совершенно спокойно.

Мы утверждаем, что «лодка движется по реке» на основании того, что изменяется её положение *относительно* берегов и предметов, на них находящихся; «луна движется», потому что меняется её положение *относительно* ветвей дерева, сквозь которые мы её наблюдаем. Но и деревья вместе с Землёй движутся вокруг Солнца...

Движение автомобиля, самолёта, теплохода легко наблюдать. Но невозможно непосредственно увидеть движение атомов и молекул. В реальности таких движений мы убеждаемся по физическим явлениям, связанным с таким движением.

Рассматривая движение, мы обычно будем иметь в виду *точку* или *материальную точку (частицу)*, см. §3, Введение. Напомним, что это целесообразно делать, если размеры тела малы по сравнению с расстояниями от него до других тел.



Вопросы

1. Что называется механическим движением?
2. Почему нужно указывать, относительно каких тел движется тело?
3. Что такое тело отсчёта? Что такое точка отсчёта?
4. В каких случаях тело можно считать точкой: а) самолёт совершает рейс из Москвы в Новосибирск; самолёт выполняет фигуру высшего пилотажа; б) космический корабль облетает Землю; космический корабль осуществляет стыковку с грузовым блоком.

*Движения нет, сказал мудрец брадатый,
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый,
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приходит:
Ведь каждый день пред нами Солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.*
«Движение» А.С. Пушкин, 1825 г.

В основу первой части этого стихотворения положен известный анекдот из истории античной философии о споре Зенона с Диогеном (V в. до н. э.). Зенон (мудрец брадатый) утверждал, что движение «есть только название, данное целому ряду одинаковых положений, из которых каждое отдельно взятое есть покой». Диоген апеллировал к непосредственному чувству (другой смолчал и стал пред ним ходить). Пушкин, соглашаясь с этим аргументом, напоминая, что **Солнце изменяет своё положение относительно Земли с течением времени, т. е. происходит механическое движение.**

§13.2. Траектория. Виды механического движения

Линия, по которой движется точка, называется **траекторией**, (рис. 3.2).

Траектория кончика ручки – это линия, оставленная на бумаге. Траектория молекулы газа – ломаная линия.

По форме траектории выделяют **прямолинейные** и **криволинейные** движения точки. В первом случае траекторией движения является **прямая линия**, во втором — некоторая **кривая**. Простейший случай криволинейного движения – **движение по окружности**.

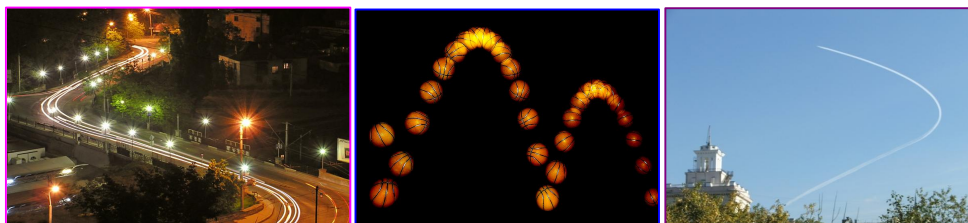


Рис. 3.2. Различные траектории движения: автомобилей по шоссе (фото с большой экспозицией), полёта мяча (стробоскопическое фото), полёт самолёта.

а тело, брошенное горизонтально, — **криволинейно**. Траектории (орбиты) планет близки к **окружностям**.

Если все точки траектории лежат в одной плоскости, движение называется **плоским**. Мы будем рассматривать только плоские движения.

Простейшими видами механического движения тела конечных размеров (твёрдого тела) являются **поступательное** и **вращательное** движения.

Движение тела называется **поступательным**, если любая прямая (В-В), соединяющая две произвольные точки тела, перемещается, оставаясь параллельной самой себе (рис. 4а.2).

Полёт пули (на небольшом участке траектории), движение автомобиля по прямому шоссе – примеры **прямолинейного** движения. Тело, выпущенное из рук на небольшой высоте над поверхностью Земли, движется **прямолинейно**,

Поступательно движется, например, поршень в цилиндре двигателя внутреннего сгорания или ящик письменного стола, когда его выдвигают. *Стакан, полный воды, мы стремимся переместить поступательно. Почему?*

Поступательное движение твердого тела может быть охарактеризовано движением какой-либо одной его точки.

При вращательном движении абсолютно твердого тела его точки описывают окружности, расположенные в параллельных плоскостях. Центры всех окружностей лежат при этом на одной прямой (O-O), перпендикулярной к плоскостям окружностей и называемой осью вращения.

Ось вращения может располагаться внутри тела (рис. 4б.2), или за его пределами (рис. 4в.2).

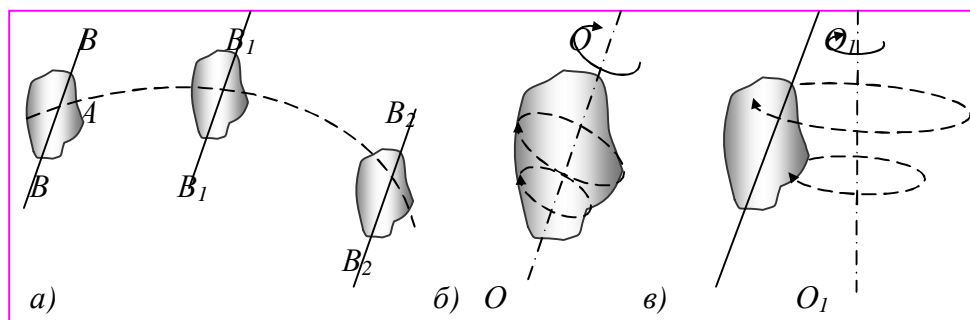


Рис.4.2. Различные виды движения тела: а) поступательное; б) вращение вокруг собственной оси (ротационное или спиновое); в) вращение вокруг оси вне тела (орбитальное).



Рис. 5.2. Вращение. Стробоскопическая фотография.

Земля совершает орбитальное вращение вокруг солнца и ротационное (суточное) вращение вокруг собственной оси. Вращение ротора электродвигателя – пример вращения тела вокруг собственной оси.

Конечно, это лишь простейшие виды механических движений. В природе обычно приходится встречаться со сложными совокупностями различных видов движений.

Колесо велосипеда вращается, а велосипедист движется поступательно. Поршни автомобильного двигателя совершают возвратно-поступательное движение в цилиндрах, автомобиль движется поступательно по шоссе. Луна вращается по орбите вокруг Земли, но всегда обращена к ней одной стороной. Совершая один оборот по орбите, Луна совершает один оборот вокруг собственной оси.

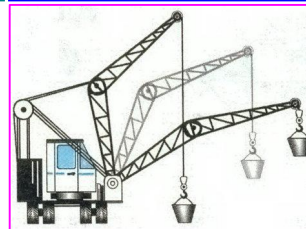


Рис. 6.2. Как движется груз? Как движется стрела крана?

Вопросы



1. Что такое траектория движения тела (точки)?
2. Какие простейшие виды механического движения вам известны?
3. Стоит ли говорить о ротационном вращении и поступательном движении точки? Почему?



Задание

На рис. 1.2; 2.2; 5.2, изображены положения тел через равные промежутки времени Δt . Что можно сказать об их движении? Ответьте на вопросы рис. 6.2.

§14. Описание механического движения

Пользуясь транспортом (поездом, автобусом, самолётом) вы обычно хотите заранее знать, где и когда вы в результате окажетесь. Для этого вы пользуетесь расписанием движения этого транспорта. Там обычно указываются названия остановок и время прибытия к ним. В физике при изучении движения тел это удобно делать несколько иначе.

§14.1. Как характеризовать положение точки (частицы)?

1). Координаты.

На рис. 1.2 было показано, что положение шарика можно *отсчитывать* от точки O (точки отсчёта), выбранной на теле отсчёта (столе). Для этого из точки O удобно провести в направлении перемещения шарика стрелку Ox . Такую стрелку называют *координатной осью*, а точку O – *началом координат*.

Например, если автомобиль находится на шоссе, на обочине которого (в точке A) растёт дерево, то вдоль шоссе от этого дерева можно мысленно (или на плане местности) провести координатную ось Ox вдоль которой отсчитывать расстояние до автомобиля, рис. 7.2. Для этого, например, можно поставить через каждый километр столбики, как обычно и поступают на дорогах.

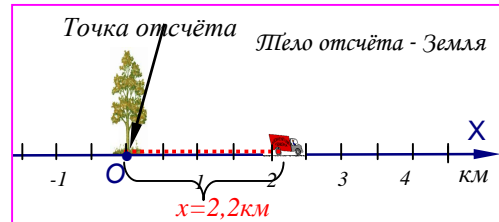


Рис. 7.2. Ось координат Ox направлена вдоль шоссе от дерева (точки отсчёта)

Но могут быть и другие варианты.

Например, на столе лежит шарик. Как охарактеризовать его положение? В этом случае потребуется система координат из двух взаимно перпендикулярных осей Ox и Oy , рис.8.2. Тогда с помощью построения, показанного пунктирными линиями на рис.8.2, можно определить координаты точки x, y , в которой расположен шарик, ответив на вопрос «где находится шарик?».

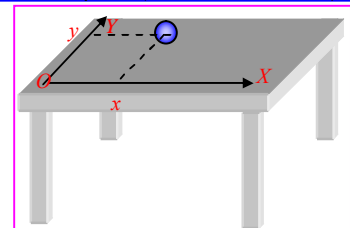


Рис. 8.2. Система координат на плоскости. Координаты шарика: x, y .

Аналогичным образом вы находите своё место в театре (например, ряд № 3 → значение y ; кресло № 9 → значение x), а штурман определяет координаты судна (например, 30° восточной долготы; 60° северной широты – координаты судна, идущего из Санкт-Петербурга в Кронштадт). Положение фигуры на шахматной доске также определяется двумя независимыми координатами: $e2$, рис.8.2,а.

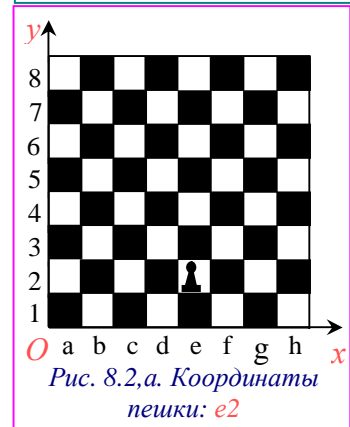


Рис. 8.2,а. Координаты пешки: $e2$

Таким образом: *местоположение точки на поверхности (плоской, сферической) определяют две координаты*.

Математики поэтому говорят, что поверхность (плоская или сферическая) имеет два измерения. Физики же называют поверхность «пространством двух измерений».

Местоположение точки в реальном пространстве определяют три координаты x, y, z (рис. 9.2). Наше пространство – *трёхмерное*.

Например, муха, летящая по комнате, или самолёт над Землёй, подводная лодка под поверхностью воды.

Таким образом, *система координат, связанная с телом отсчёта, позволяет определить местоположение тела*.

2). Радиус-вектор

Можно положение тела характеризовать не координатами, а *радиус-вектором*.

Радиус-вектор – это вектор, проведённый из начала координат (точки O) к телу (частице), рис. 10.2. Здесь ON – направление отсчёта, также связанное с телом отсчёта. Чтобы определить положение на плоскости точки M , надо указать

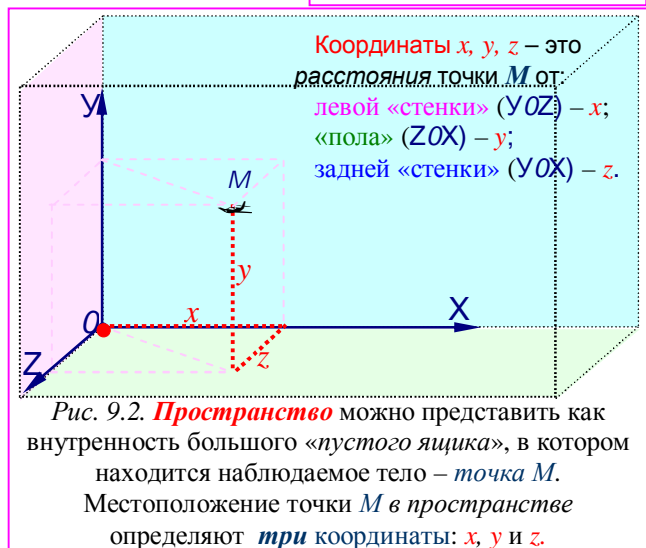


Рис. 9.2. *Пространство* можно представить как внутренность большого «пустого ящика», в котором находится наблюдаемое тело – точка M . Местоположение точки M в пространстве определяют *три* координаты: x, y и z .

модуль (длину) радиус-вектора \vec{r}_M и его *направление*, т. е. угол α между направлением на точку M и направлением отсчёта ON . Подобный способ задания положения точки удобно использовать при ориентации на местности, *рис. 11.2*.

В пространстве *трёх* измерений, например при определении местоположения самолёта, приходится использовать два угла (α - в горизонтальной и θ - в вертикальной плоскости), а также длину (модуль) радиус-вектора r . Тоже три величины – по числу трёх измерений. Такой способ определения положения используется в современных навигационных приборах.

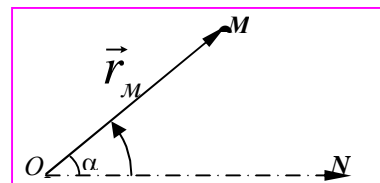


Рис. 10.2. Радиус-вектор точки M . ON – направление отсчёта.



Вопросы

1. Назовите способы задания положения точки.
2. Что такое тело и точка отсчёта?
3. Зачем вводятся координаты?
4. Что такое радиус-вектор?



§14.2. Время

Тук-так...



Механическое движение происходит в пространстве (x, y, z) с течением времени (t) . Поэтому, чтобы охарактеризовать механическое движение точки, не достаточно указать только её положение, ответить на вопрос *где* находится тело.

Необходимо указать также *момент* времени t , *когда* оно там находится, (*замечание: момент* времени отличается от *промежутка* времени, как *точка* на линии от её *отрезка*). Для этого необходим прибор для отсчёта времени (*часы, метроном*) от произвольно выбранного начального момента времени t_0 . Время всегда изменяется в одну сторону – *от прошлого к будущему*. В этом смысле время за период наблюдения всегда величина положительная $t > 0$ (обратите внимание: *координаты могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, рис.7.2*).

Понятия *пространства* и *времени* являются чрезвычайно важными в физике. Здесь мы с вами *впервые* встретились с их некоторыми свойствами. В будущем вы узнаете, что они тесно связаны между собой, что из их свойств вытекают *наиболее фундаментальные законы физики*.

§14.3. Система отсчёта. Относительность движения

Система координат, тело отсчёта, с которой она связана, и часы образуют систему отсчёта, относительно которой рассматривается движение точки, рис.1.2; 7.2 – 9.2.

Тело отсчёта + система координат + часы = система отсчёта, рис. 12.2.

Вместо осей координат, можно пользоваться радиус-вектором, выбрав точку O и направления отсчёта.

С помощью системы отсчёта можно отслеживать местоположение тела в каждый момент времени при его движении.

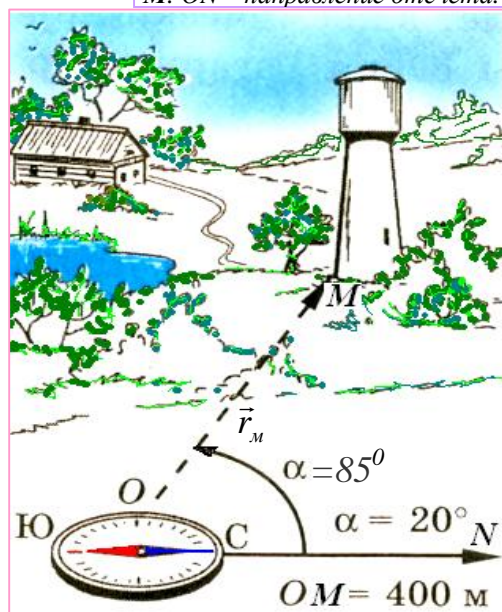


Рис. 11.2. Ориентация на месте с использованием радиус-вектора \vec{r}_M для определения положения точки M .

Обычно *тело отсчёта* выбрать легко (очень часто это – Земля). Но с выбором связанной с ним *системы координат* (точки O и координатных осей), как **ориентира** при определении местоположения тела, нередко возникают сложности. Так бывает в тумане, в пустыне, в лесу. Это была серьёзная проблема мореплавателей. Препятствия, определяя свои координаты, ориентировались по звёздам. Очень много усилий было затрачено на изобретение точных часов.

Современные приборы (их часто называют просто «навигаторами») позволяют ориентироваться по звёздам и искусственным навигационным спутникам для определения местоположения тела (*судна, автомобиля, путешественника*) в каждый момент времени. Местоположение движущегося тела обычно высвечивается на карте в виде точки на экране и дублируется числовыми значениями координат. Такие приборы автоматически используют и *тело отсчёта*, и *координаты*, и *часы*. Это, конечно, очень удобно.

Ну а как *наблюдателю*, связанному с определённым телом отсчёта, представляется механическое движение в различных *системах отсчёта*?

Представьте, что вы движетесь в автомобиле по дороге.

Перемещаетесь вы или нет? Смотря в окно, вы видите, как улетают назад дома и деревья. Поэтому вы, конечно, ответите: да. И будете правы. На шоссе расстояние (координату x) от города проще всего определить по *километровым столбам*. **Тело отсчёта – Земля; точка отсчёта O координаты x – столб у города в начале дороги.**

С другой стороны, вы как сидели в автомобиле на заднем сиденье, так и продолжали сидеть. Значит, ваше положение относительно автомобиля не менялось, вы *не двигались*. Но в этом случае **тело отсчёта – автомобиль!**

А задумались ли вы о том, что, сидя на диване дома, вы покоитесь относительно Земли, но вместе с Землёй несётесь вокруг Солнца (если **Солнце – тело отсчёта**) с колоссальной скоростью – около 30 км/с!

Таким образом, понятия «покой» и «движение» – *относительны*. Всё зависит от выбора **тела отсчёта**, а, следовательно, и от выбора *системы отсчёта*, рис. 13.2.

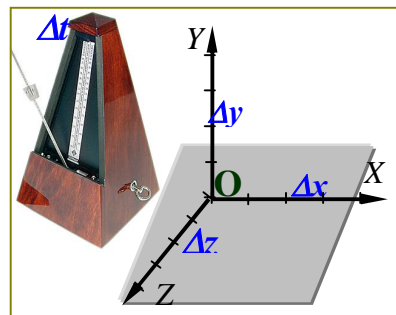


Рис. 12.2. Система отсчёта = тело отсчёта + система координат + часы



Рис. 13.2. Самолёты в эскадрильи или птицы в стае при перелёте движутся относительно Земли, но покоятся друг относительно друга.

Вопросы

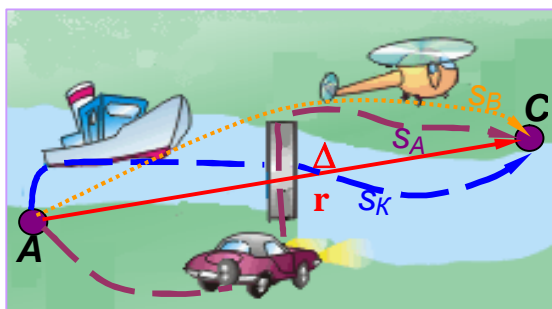


1. Что такое система отсчёта?
2. В чём заключается относительность покоя и движения? Поясните примерами.

§15. Путь и перемещение

Путь, пройденный телом за время наблюдения – это длина отрезка его траектории. Путь обозначают буквой s . Это расстояние, пройденное телом, которое характеризуется одним числом, соответствующим его длине. **Путь s – скалярная физическая величина.**

Перемещение – это направленный отрезок прямой линии – стрелка, соединяющая точки начала и конца пути. Перемещение $\Delta r = \overrightarrow{AC}$ – **вектор**. Вектор характеризуется не только **величиной** (модулем), но и **направлением**. На чертеже вектор обозначается **стрелкой**, рис. внизу. **Перемещение характеризует изменение положения точки.**



Из пункта A в пункт C нужно переместить груз. Это можно сделать разными путями: на автомобиле через мост, на лодке по реке или на вертолете по воздуху. В каждом из этих случаев пути, преодоленные грузом, будут разными: s_A , s_K , s_B . Однако неизменным будет перемещение груза: из точки A в точку C .

Перемещение обозначено красной стрелкой.

Перемещение $\Delta r = \overrightarrow{AC}$ – вектор.

Если вы выходите из дома гулять, а потом возвращаетесь домой, ваша *траектория* и, следовательно, *путь* могут быть сложными и длинными. Но если, в конце концов, вы возвращаетесь домой, то ваше *перемещение* за время всей прогулки оказывается равным нулю. Путь длиннее перемещения, если движение непрямолинейное, *рис. 13.2*. Длина пути и вектора перемещения совпадают, если только вы двигались по прямой линии в одну сторону. Практически к этому можно приблизиться, используя воздушный транспорт (самолёт, вертолёт). Например, если в случае, изображенном на *рис. 13.2*, на вертолёте перелететь по прямой *АС*, путь и перемещение вертолётчика практически совпадут.

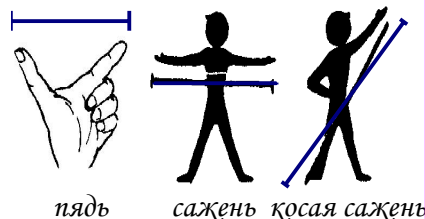
На *рис. 17.1.б* (см. *Главу I*) показаны отдельные перемещения частицы за равные промежутки времени Δt , а также *конечное* перемещение за *всё время* её наблюдения. Рассматривая подобные рисунки, нетрудно понять, что, выбирая достаточно малые промежутки времени Δt , ломаная линия *приближается к истинной траектории частицы*. Здесь мы опять встречаемся с *предельным* переходом, рассмотренным во *Введении* (см. там *рис. 10*, а также стр. 201, *внизу*).

На этом основана киносъёмка фильмов: последовательные кадры фильма – это фотографии снятые с интервалом времени $\Delta t = 1/25$ секунды. На киноэкране нам показывают последовательно эти фотографии. Этого достаточно, чтобы мы воспринимали последовательность этих изображений как *непрерывно* происходящее движение.

И путь, и *модуль* перемещения измеряются в единицах *длины*. В *Международной системе (СИ)* такой *единицей* является *метр (м)*. Используются и другие единицы длины: *миллиметр (мм), сантиметр (см), дециметр (дм), километр (км)*:

$$1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}; 1 \text{ дм} = 0,1 \text{ м}; 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}; 1 \text{ км} = 1000 \text{ м}.$$

Раньше в качестве единиц измерения длины применялись: пядь, сажень, косая сажень, локоть, фут (foot – ступня), дюйм (ширина большого пальца у основания), конный переход, полет стрелы, верста. Ясно, что об «одинаковости» и точности таких единиц говорить не приходилось. Поэтому и ввели СИ.



Вопросы



1. Что такое путь? Чем он характеризуется?
2. Как называется величина, характеризующаяся только численным значением?
3. Что такое перемещение? Чем оно характеризуется?
4. Что такое векторная величина?
5. Может ли путь быть меньше модуля перемещения? Когда эти величины равны?
6. Может ли сумма последовательных перемещений быть меньше конечного перемещения – от начала до конца движения?
7. Каким образом на киноэкране достигается эффект движения?



Упражнение

1. Точка движется от поверхности Земли вертикально вверх и достигая максимальной высоты h , падает вниз. Каков пройденный точкой путь и каково её перемещение?
2. Велосипедист движется по кругу радиуса R . За какой-то промежуток времени Δt он проехал половину длины окружности. Чему равен путь и перемещение, проделанные велосипедистом. Сделайте соответствующий эскиз.

§ 16. Прямолинейное движение

§ 16.1;(14). Равномерное и неравномерное прямолинейное движение

Если тело за любые равные промежутки времени Δt проходит одинаковые пути Δs , его движение равномерное, рис.14.2.

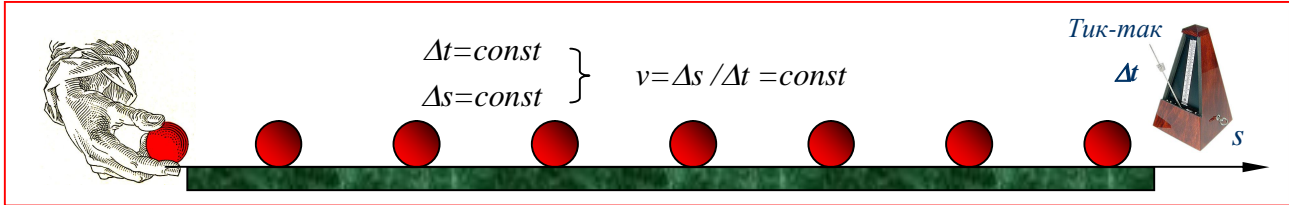


Рис. 14.2 При равномерном прямолинейном движении тело за одинаковые промежутки времени Δt проходит одинаковые отрезки пути Δs .

Например, автомобиль за каждый час проходит 72 км, за каждые полчаса – 36 км, за каждые четверть часа – 16 км и т. д. вплоть до минут, секунд, долей секунды. Но реальное движение к равномерному может лишь приближаться, рис.14.2,а. Молекула газа от одного соударения до другого движется равномерно.

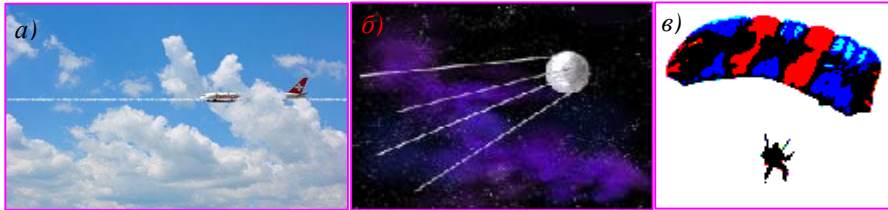


Рис. 14.2,а. Равномерно и прямолинейно движется самолёт с включённым автопилотом (а). К равномерному движению близки движение спутника вокруг Земли (б) и парашютиста (в).

Если тело за равные промежутки времени Δt проходит разные отрезки пути Δs , его движение неравномерное, рис.16.2.

Падающее тело или поезд, отходя от станции, проходят за одинаковые промежутки времени Δt все большие и большие пути Δs . Тело, брошенное вверх или поезд, отходя к станции, наоборот, проходят за одинаковые промежутки времени Δt все меньшие пути Δs . Конькобежец, участвуя в соревнованиях, пробегает одинаковые отрезки пути в различное время.

Это примеры неравномерного движения.

Обычно равномерность движения нарушает многими причинами. Поэтому большинство реальных движений – неравномерные, рис.15.2.



Рис. 15.2,а. Неравномерное (ускоренное) движение: в равные последовательные промежутки времени Δt тело проходит всё большие отрезки пути Δs : а) разгон самолёта перед взлётом; б) ускорение мотоцикла.

Рис. 15.2,б. Неравномерное (замедленное) движение: в равные последовательные промежутки времени Δt тело проходит всё меньшие отрезки пути Δs : а) торможение самолёта перед взлётом; б) торможение лошади.

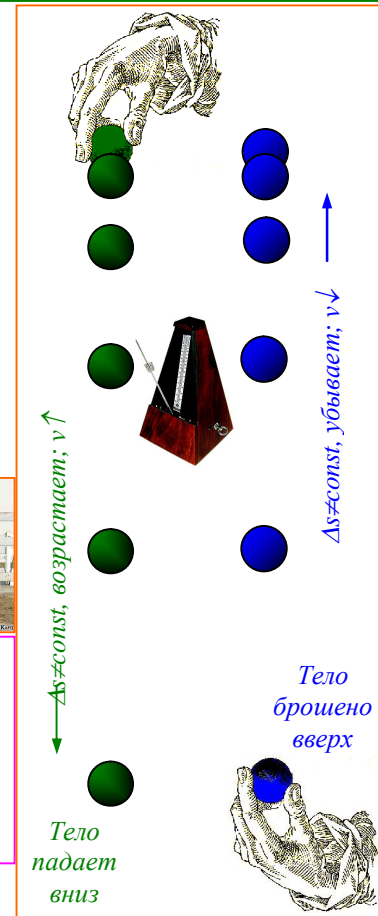


Рис. 15.2 При неравномерном движении тело за одинаковые промежутки времени Δt проходит неодинаковые отрезки пути Δs .

§16.2. Табличный и графический способы задания движения

При движении тела его координаты меняются с течением времени. Чтобы решать задачи механики, обычно надо знать, как изменяется *координата* тела s со временем t . Каждому

моменту времени t соответствуют определённые координаты положения тела (точки) M . Для прямолинейного движения вдоль оси OS это записывается так: $s(t)$, что можно представить таблицей или графиком, рис. 16.2.

Таблица соответствует графикам рис. 16.2.
Зависимости координаты (пройденного прямолинейного пути) от времени $s(t)$

а) Тело покоится						
Координата тела (точки) s , м	20	20	20	20	20	20
Время t , с	0	1	2	3	4	5
б) Тело движется равномерно						
Координата тела (точки) s , м	0	1	2	3	4	5
Время t , с	0	1	2	3	4	5
в) Тело движется неравномерно (ускоренно)						
Координата тела (точки) s , м	0	1	4	9	16	25
Время t , с	0	1	2	3	4	5

Примерно так разгоняется легковой автомобиль.

Это **таблица**
Она точно, но
ненаглядно
показывает
зависимость
величины s от t

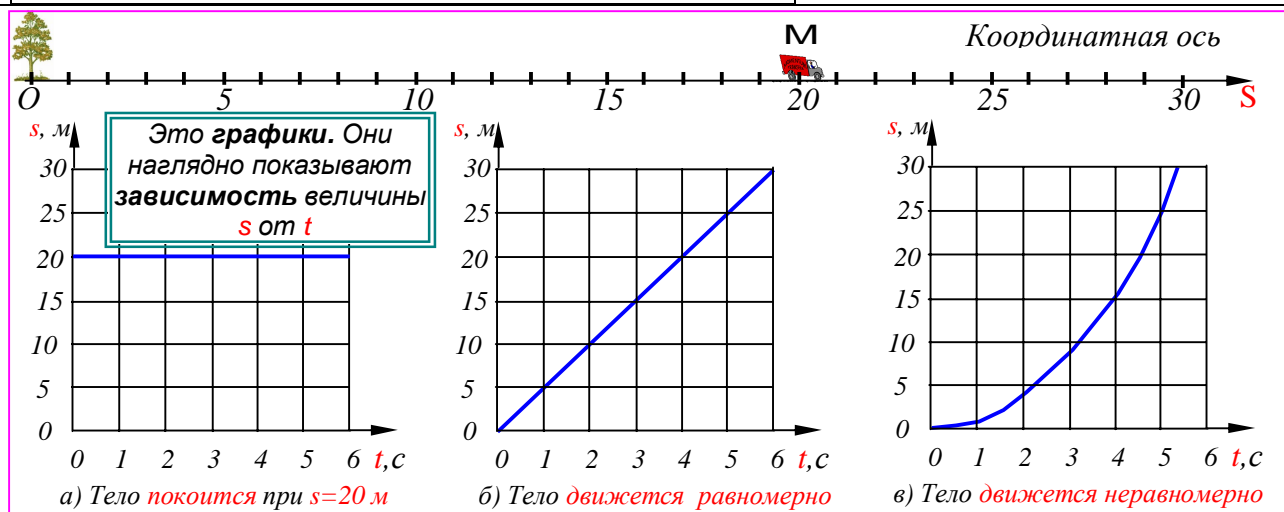


Рис. 16.2. Зависимость пройденного пути s от времени t можно представить в виде графиков $s(t)$ для неподвижной (а) и движущейся прямолинейно (равномерно (б) и ускоренно (в)) точки M .

Далее вы узнаете, что зависимость $s(t)$ можно задать **формулой**. Именно такой способ чаще всего используется в теоретической физике. Он называется **аналитическим**.



Вопросы

1. Какое движение называют равномерным?
2. Какое движение называют неравномерным?
3. Приведите примеры равномерного и неравномерного движений.
4. Какие способы задания движения вы знаете?
5. Каким движениям соответствуют графики на рис. 16.2, а, б, в? Как можно характеризовать неравномерное движение в случае в)? Почему?
6. Каким образом движется брошенный вверх мяч?
7. Вы едете в поезде. У вас часы с секундной стрелкой (можно воспользоваться собственным пульсом). Как определить равномерно ли движется поезд?



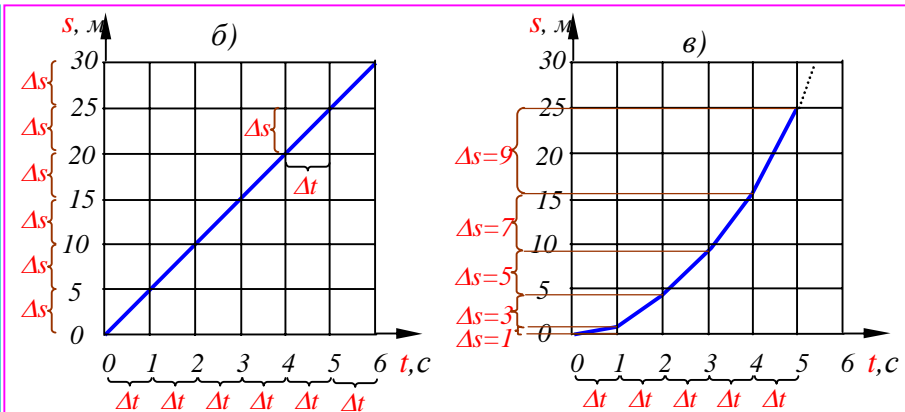
Задание

1. Рассмотрите внимательно рис. 16.2 и 17.2. Ответьте на поставленные

там вопросы.

2. Укажите на оси OS рис.16.2 (б) и (в) точку, соответствующую графику рис. 16.2 (а).

Рис. 17.2. Здесь изображены те же графики, что на рис.16.2, б), в).
 Ответьте на вопросы:
 б) Какие расстояния (в м) проходит тело каждую секунду при данном равномерном движении? в) Какие расстояния (в м) проходит тело при данном неравномерном движении в каждую последующую секунду? На сколько (м) они изменяются?



§ 17. Начальные понятия о скорости движения тела

§ 17.1; (15). Скорость v равномерного движения. Единицы скорости

Равномерно движущийся по шоссе автомобиль перегоняет идущего равномерно человека. Чем отличаются эти два равномерных движения: пешехода и автомобиля? Их отличие в том, что *автомобиль движется быстрее пешехода. Самолет движется быстрее автомобиля*, а искусственный спутник Земли – быстрее самолета. Это значит, что *в течение одного и того же промежутка времени Δt автомобиль проходит больший путь Δs , чем пешеход, а самолет – больший, чем автомобиль*. Но ещё больший путь Δs за тоже время Δt

Замечание. Обычно ось в направлении движения обозначают Ox ; координату точки – буквой x , а пройденный за время Δt путь – Δs . А весь путь, пройденный за время t , буквой s .

Не следует путать пройденный путь s и координату точки x : они совпадают не всегда: координата x характеризует положение точки на оси Ox , а путь Δs – это отрезок траектории (он может быть больше)!

пролетает спутник.

Движения пешехода, автомобиля, самолета и спутника различаются между собой **скоростью**. Скорость обозначают буквой v .

Скорость тела v при равномерном движении показывает, какой путь проходит тело в единицу времени.

Например, если за каждый час велосипедист проезжает 12 км, а самолет пролетает 900 км, то говорят, что *скорость велосипедиста 12 км в час*, а *скорость самолета 900 км в час*. А записывают это так:

скорость велосипедиста $v=12$ км/час;

скорость самолета $v=900$ км/час.

Чтобы определить скорость тела при **равномерном** движении, надо **путь**, пройденный телом, разделить на **время**, за которое он пройден:



$$\text{скорость} = \frac{\text{путь}}{\text{время}}$$

Это формулы. Они наглядно показывает зависимость между величинами s, v и t

Если обозначить весь пройденный **путь** буквой s , затраченное на его прохождение **время** – буквой t , а **скорость** буквой v , то получим формулу для определения скорости при **равномерном** движении:

$$v = \frac{s}{t} \quad [1.2]$$

Скорость тела v при равномерном движении равна отношению пройденного пути s к промежутку времени t , за которое этот путь пройден.

При равномерном движении скорость не изменяется; она является постоянной величиной. Это записывается так: $v = \text{const}$.

В Международной системе (СИ) скорость измеряют в метрах на секунду (м/с или $\frac{\text{м}}{\text{с}}$).

Это значит, что за единицу скорости принимается скорость $v=1 \text{ м/с}$ такого равномерного движения, при котором за 1 секунду тело проходит путь, равный 1 метру.

Скорость тела можно измерять также в километрах в час ($\frac{\text{км}}{\text{час}}$); километрах в секунду

($\frac{\text{км}}{\text{с}}$); сантиметрах в секунду ($\frac{\text{см}}{\text{с}}$).

Пример. Поезд, двигаясь равномерно, за 2 ч проходит путь, равный 108 км. Вычислите скорость движения поезда.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:	Решение:
$s=108 \text{ км}$	$v = \frac{s}{t}$
$t=2 \text{ ч}$	$v = \frac{108 \text{ км}}{2 \text{ ч}} = 54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$
$v=?$	

Выразим скорость поезда в единицах СИ, т. е. километры переведем в метры, а часы в секунды:

$$54 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{54000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ответ: $v = 54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, или $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Таким образом, числовое значение скорости (как и любой другой физической величины – длины, объема и пр.) зависит от выбранной единицы измерения.

До сих пор мы говорили только о величине, численном значении скорости. Но **скорость, кроме числового значения, имеет и направление, рис. 18.2.**

Если требуется узнать, где будет находиться через 2 ч самолет, вылетевший из Владивостока, то необходимо знать не только численное значение его скорости, но и ее направление.

Величины, которые, кроме числового значения (модуля), имеют еще и направление, называют **векторными**.

Скорость – векторная величина.

Все векторные величины обозначают соответствующими буквами со стрелочкой сверху.

Например, **вектор** скорости обозначается буквой со стрелочкой \vec{v} , а **модуль** (числовое значение вектора) скорости той же буквой, но без стрелочки v .

Некоторые физические величины характеризуются только числовым значением. Они не имеют направления. Такие величины называют **скалярными**.

Скалярными величинами являются: температура, время, объем, длина, путь и др.

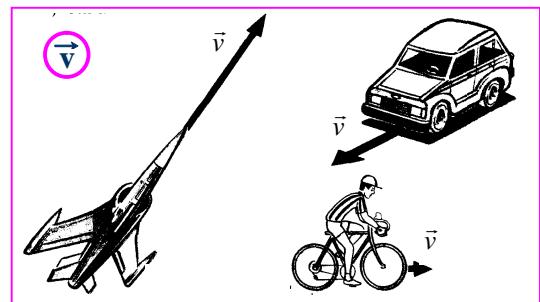


Рис. 18.2; (37). Скорость – это вектор. На рисунках стрелки показывают величину и направление векторов скоростей тел.



Вопросы

1. Чем отличаются друг от друга равномерные движения пешехода, автомобиля и самолета?

2. Что показывает скорость равномерного движения?
3. Как определить скорость движения, зная пройденный путь и время?
4. Как выразить скорость, данную в $\frac{\text{км}}{\text{ч}}$, в $\frac{\text{м}}{\text{с}}$?
5. Чем, кроме числового значения, характеризуется скорость тела?
6. Верно ли утверждение, что концы минутных стрелок всех часов движутся с одинаковой скоростью?



Упражнение

1. Плот, плывущий по реке, прошел за 20 мин путь 900 м. Определите скорость движения плота (в м/с).
2. Велосипедист, двигаясь равномерно, проехал за 30 мин путь 9 км. Определите скорость велосипедиста (в м/с).
3. Скорость электровоза равна 90 км/ч. Выразите эту скорость м/с.



§ 17.2; (15). Средняя скорость v_{cp} неравномерного движения

Вы уже знаете, что чаще тела движутся неравномерно. При неравномерном движении тело проходит за одинаковые промежутки времени неодинаковые пути (см. рис. 16.2, б и в; 17.2). Скорость такого движения не является постоянной величиной ($v \neq const$).

Но часто говорят о какой-то *одной* определённой скорости поезда или о скорости автомобиля, хотя знают, что на остановках скорость их равна нулю, потом она увеличивается, а перед следующей остановкой уменьшается. Какую же скорость подразумевают, указывая, например, что *скорость поезда 50 км/ч*?

Говоря о скорости какого-нибудь *неравномерного* движения, обычно имеют в виду *среднюю скорость* v_{cp} этого движения на *всём* участке пути s за *весь* промежуток времени t движения. Чтобы ее подсчитать, делят пройденный путь s на время t движения, т. е. поступают так же, как при вычислении скорости равномерного движения.

Это удобно, потому что позволяет делать приближенные оценки (обычно меняющейся) истинной (мгновенной) скорости

Чтобы определить среднюю скорость v_{cp} тела при неравномерном движении, надо весь пройденный путь s разделить на все время t движения:

$$\text{Средняя скорость } v_{cp} = \frac{\text{путь(пройденный)}}{\text{время(затраченное)}}, \text{ или } v_{cp} = \frac{s}{t}. \quad [1.2]$$

Пример. Расстояние между Москвой и Новосибирском $s=3200$ км. Поезд, двигаясь неравномерно, останавливаясь на станциях, проходит это расстояние за $t=64$ ч. Но можно *предположить*, что это расстояние поезд прошел за те же 64 ч, но двигался равномерно.

Тогда скорость этого равномерного движения была бы равна:

$$v_{cp} = \frac{s}{t}, v_{cp} = \frac{3200 \text{ км}}{64 \text{ ч}} = 50 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Это и есть *средняя скорость неравномерного движения* поезда.

При неравномерном движении тела средняя скорость характеризует движение тела за *весь* промежуток времени t . Она не поясняет, как двигалось тело в различные моменты времени этого промежутка.



Вопросы

1. Какую скорость имеют в виду, когда говорят о скорости движения поезда, автомобиля?

2. Как определяют среднюю скорость неравномерного движения?

$$s=vt$$

$$v=\frac{s}{t} \quad t=\frac{s}{v}$$

§ 18; (16). Расчёт пути и времени движения

Из изложенного выше (см. [1.2]) следует, что зависимость между величинами s , v и t имеет вид (для равномерного движения и для средней скорости при неравномерном движении):

$$s=vt; \quad v=\frac{s}{t}; \quad t=\frac{s}{v}. \quad [1.2]$$

Поэтому, чтобы определить путь s , пройденный при **равномерном** движении, надо скорость v тела умножить на время t его движения: $s = vt$. [1.2]*

Пусть, например, поезд равномерно движется со скоростью $v=20$ м/с. Это значит, что за каждую секунду он проходит путь 20 м. Тогда за 5 с поезд пройдет путь в 5 раз больший, чем за 1 с, то есть $20 \text{ м/с} \times 5 \text{ с} = 100 \text{ м}$, а за 10 с - в 10 раз больший, т. е. $20 \text{ м/с} \times 10 \text{ с} = 200 \text{ м}$ и т. д.

Чтобы определить время t движения, зная путь s и скорость v **равномерного** движения тела, надо путь s разделить на скорость v : $t = \frac{s}{v}$ [1.2]**

Определим, за какое время t пешеход, скорость которого $v=1,5$ м/с, пройдет путь $s=3$ км, т. е. 3000 м. Подставляя в последнюю формулу числовое значение пути s и скорости v , мы найдём время t :

$$t = \frac{3000 \text{ м}}{1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 2000 \text{ с} \cong 0,56 \text{ ч.}$$

Так как среднюю скорость $v_{\text{ср}}$ неравномерного движения вычисляют, предполагая, что движение является равномерным, то по средней скорости $v_{\text{ср}}$ можно вычислить путь s и время t , по этим же формулам и для неравномерного движения.

Путь s , пройденный телом при **неравномерном** движении, равен произведению средней скорости $v_{\text{ср}}$ на время движения t :

$$s=v_{\text{ср}}t$$

Время t , необходимое для прохождения какого-нибудь пути s при **неравномерном** движении, равно частному от деления этого пути на **среднюю** скорость $v_{\text{ср}}$:

$$t=\frac{s}{v_{\text{ср}}}$$

Средние скорости $v_{\text{ср}}$ движения: некоторых тел, скорость звука, радиоволн и света, м/с

Таблица 1

Улитка	0,0014	Самолет Ил18	180
Черепаша	0,05-0,14	Звук в воздухе при 0°C	332
Муха комнатная	5	Пуля (при вылете из ствола)	715
Пешеход	1,2 – 1,8	Луна вокруг Земли	1000
Конькобежец	до 13	Молекула водорода (при 0°C)	1693
Скворец	20	Молекула водорода (при 20°C)	1755
Страус	22	Искусственный спутник Земли	8000
Тепловоз ТЭЮЛ	до 28	Земля вокруг Солнца	30000
Автомобиль Жигули	около 30	Свет и радиоволны	около 300 000 000



Вопросы

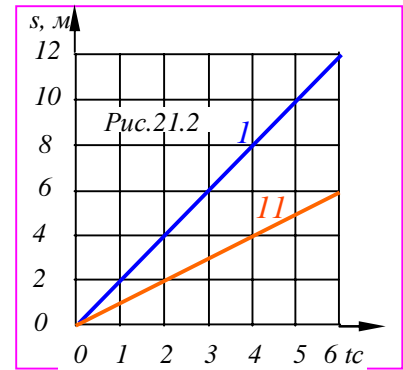
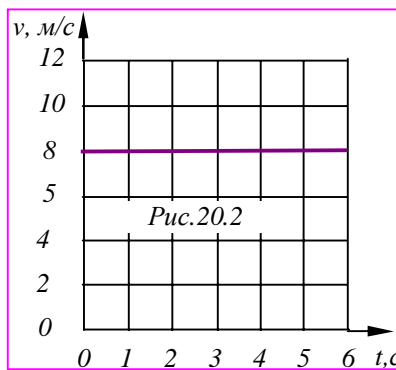
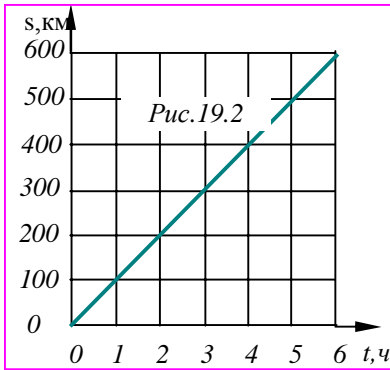
1. Как определяют путь, пройденный телом при равномерном движении, если известны скорость и время движения? Как по пути и скорости определить время равномерного движения?

2. Ответьте на такие же вопросы для случая неравномерного движения.

Упражнение



1. Найдите в таблице 1 скорости пешехода, конькобежца, тепловоза и определите пути, пройденные этими телами за 10 с.
2. Самолет летит со средней скоростью 750 км/ч. Какой путь он пролетит за 6 ч полета?
3. Какое время понадобится тепловозу и самолету для прохождения пути 4000 м? (Скорости этих тел указаны в таблице 1).



4. На рис. 19.2; (38) показан график зависимости пути s равномерного движения тела от времени t . O_s – ось пройденного пути, O_t – ось времени. По этому графику определите, чему равен путь, пройденный телом за 2 ч. Затем рассчитайте скорость тела.
5. График зависимости скорости равномерного движения от времени представлен на рис. 20.2; (39). По этому графику определите скорость движения тела. Рассчитайте путь, который пройдет тело за 2 ч, 4 ч.
6. По графикам зависимости путей от времени, рис.21.2; (40), двух тел, движущихся равномерно, определите скорости этих тел. Скорость какого тела больше?

$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} = const$

*Ехали медведи
На велосипеде.*

*А за ними кот
Задом наперед.*

*А за ним комарики
На воздушном шарике.*

*А за ними раки
На хромой собаке.*

Тик-так

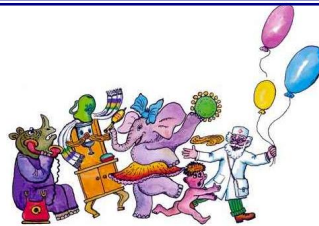
Δt

*Волки на кобыле.
Львы в автомобиле.*

*Зайчики
В трамвайчике.*

Жаба на метле...

*Едут и смеются,
Пряники жуют*

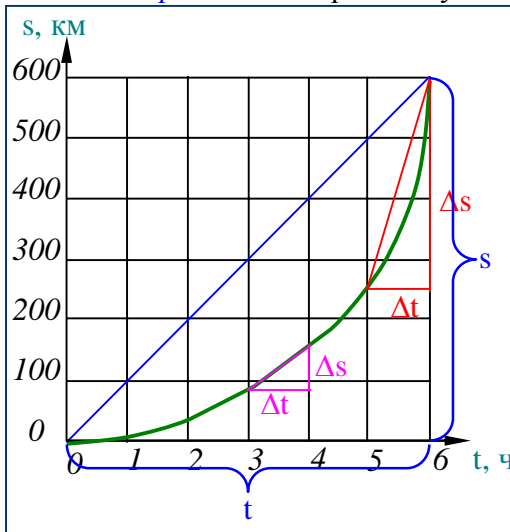




§ 19. Скорость при неравномерном движении средняя и мгновенная (истинная)

$$v_{cp} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \rightarrow v = \frac{ds}{dt}$$

Часто *среднюю* скорость нужно бывает вычислить не за *всё* время движения t , а за



меньший промежуток времени Δt . В соответствии с определением средней скорости v_{cp} , в этом случае пройденный за время Δt путь Δs надо разделить на промежуток времени Δt :

$$v_{cp} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad [1.2]$$

На *рис. 22.2* представлен график зависимости пути от времени $s(t)$ для неравномерного (ускоренного) движения. Заменим *истинную кривую $s(t)$* хордой или *ломаной* линией, как это было сделано с окружностью на *рис. 10* (см. **Введение**). Тогда будет видно, что средняя скорость v_{cp} за *всё* время движения ($\Delta t = t = 6$ часов) отличается от средних скоростей v_{cp} за каждый час ($\Delta t = 1$ ч.) движения, *рис. 22.2*.

Рис. 22.2. Средние значения скорости за всё время движения v_{cp} и за каждый час движения v_{cp} ; v_{cp}

При уменьшении промежутка $\Delta t \rightarrow 0$ («стягиванию» его к точке t), среднее значение скорости приближается к её *мгновенному* значению $v_{cp} \rightarrow v(t)$.

Это записывается так: $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = v$

$$v_{cp} = \frac{s}{t}; \quad v_{cp} = \frac{\Delta s}{\Delta t}; \quad v_{cp} = \frac{\Delta s}{\Delta t};$$

Отношение $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ будет совпадать с отношением $\frac{s}{t}$ ($s = 600$ км; $t = 6$ ч) только в случае *равномерного* движения.

Кроме того (так же, как с увеличением числа сторон вписанного многоугольника его периметр приближается к окружности, *рис. 10*), в данном случае при уменьшении промежутков $\Delta t \rightarrow 0$, *среднее* значение скорости v_{cp} приближается к её *истинному* (*мгновенному*) значению $v_{cp} \rightarrow v(t)$ в «момент» t , к которому «стягивается» интервал Δt . Это

записывается так:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = v(t). \quad [1.2*]$$

А читается так: «предел отношения $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ пройденного отрезка пути Δs за промежуток времени Δt при $\Delta t \rightarrow 0$ равен мгновенной скорости v ».

Мгновенная (истинная) скорость $v(t)$ – это физическая величина, характеризующая быстроту движения тела **в данный момент** времени t .

Здесь символ «lim» означает «предел». А под «моментом времени» t подразумевается «бесконечно малый» промежуток Δt , так сказать «временная точка». Обратите внимание, что при этом и Δs тоже стягивается к соответствующей *точке* на траектории!

В физике обычно важно знать не среднюю, а *мгновенную (истинную)* скорость. Но в этом случае опять приходится иметь дело с некоторым *предельным переходом!* Предельные значения физических величин (*состояний, понятий*), как вы убедитесь в дальнейшем, вообще имеют большое значение в теоретической физике.

Мгновенную скорость можно представить как среднюю скорость за очень маленький промежуток времени.



А теперь сделаем очень важное обобщение – рассмотрим математический способ нахождения таких предельных переходов.

Если отвлечься от изучения конкретного вопроса о *мгновенной скорости*, заменив переменные величины

$$\begin{aligned} s(t) &\rightarrow y(x); \\ t &\rightarrow x, \\ v(t) &\rightarrow f'(x) \end{aligned}$$

то равенство [1.2*] примет вид:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = f'(x). \quad [1.2^*, a]$$

Полученная формула [1.2*, a] имеет чрезвычайно большое значение в науке вообще. Её можно записать подробнее:

$$f'(x) = \operatorname{tg} \alpha = \lim_{M_1 \rightarrow M} \frac{y_1 - y}{x_1 - x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}. \quad [1.2^*, a]$$



Эта величина называется **производной** функции $y(x)$ по переменной x .

Последние две формулы совершенно равнозначны. Это просто разные обозначения одного и того же. Их смысл поясняется *рис. 23.2*, откуда видно, что

отношение $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ приращения Δy функции к изменению аргумента Δx характеризует **быстроту изменения функции $y(x)$ на участке MM_1** .

Очевидно, что приближение точки M_1 к M означает то же, что и **предельный** переход $\Delta x \rightarrow 0$. При этом **секущая** переходит в **касательную** к функции $y(x)$, а отношение $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ **вертикального**

Δy и горизонтального Δx катетов прямоугольного треугольника (имеющего гипотенузу MM_1) переходит в $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона **касательной** к оси Ox в точке M .

Предельный переход $\Delta x \rightarrow 0$ означает, что Δx переходит в «бесконечно малую», точечную величину dx с ординатой x точки M . При этом Δy переходит в «бесконечно малую», точечную величину dy с абсциссой y точки M . Величины dx и dy называются **дифференциалами** величин x и y .

Отношение $\frac{dy}{dx}$ «бесконечно малого» приращения dy функции к «бесконечно малому» изменению аргумента dx характеризует **быстроту изменения функции $y(x)$ в точке M** . Это и есть **производная функции $f'(x) \equiv y'(x)$ в этой точке**.

Из *рис. 23.2* видно, что производная $f'(x)$ равна тангенсу угла α наклона касательной к кривой $y(x)$ в этой точке.

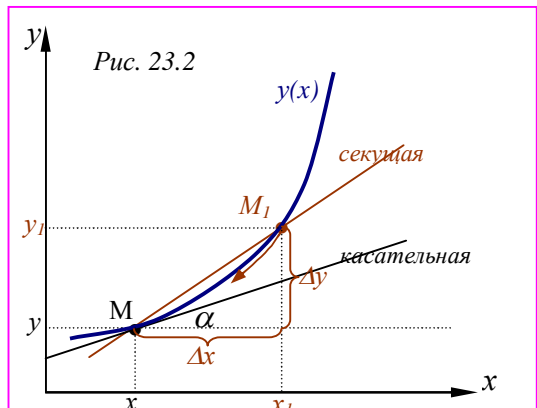
В частности, мгновенная (истинная) путевая скорость $v(t)$ точки (в любой момент времени t) – это просто производная $s'(t)$ от пути s по времени t :

$$v(t) = s'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

Открытие производной (сделанное И. Ньютоном и Лейбницем почти одновременно и независимо друг от друга) заложило основы могучего метода исследования природы – высшей математики. Не пугайтесь математики. Математика – это очень **естественный, самый краткий, простой и точный язык природы**. Надо только научиться им пользоваться! И это совсем не сложно. Сначала привыкните к использованию обозначений величин соответствующими символами, а дальше всё пойдёт само собой.

Без высшей математики не было бы не только современной физики, но и всей современной цивилизации. Мир был бы совершенно иным. Не было бы ни электродвигателей, ни радио и телевидения. Было бы то, что существовало в эпоху раннего средневековья, крестовых походов и инквизиции. Или то, что сегодня существует в глубинных районах Африки.

Постарайтесь хорошо разобраться в том, что такое **производная**. Это понятие только сначала кажется сложным. В дальнейшем с ним придётся встречаться очень часто. Оно поможет понять вам очень многое.



К определению производной функции $y(x)$ по переменной x (в точке M): $f'(x) = \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \alpha$



Лейбниц Готфрид (1646-1716)

§ 20. УСКОРЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

При неравномерном движении (см. рис.15.2) скорость тела (точки) \vec{v} изменяется со временем t . Это записывается так: $\vec{v}(t) \neq \text{const}$.

Величина, характеризующая изменение скорости в единицу времени, называется **ускорением**:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad [2.2]$$

Ускорение \vec{a} – векторная величина. Её направление всегда совпадает с направлением вектора приращения скорости $\Delta \vec{v}$.

Подобно тому, как скорость \vec{v} характеризует *быстроту изменения положения* $\vec{s}(t)$, ускорение \vec{a} характеризует *быстроту изменения скорости* $\vec{v}(t)$ движения точки.

При *прямолинейном* движении все векторы, его характеризующие – перемещение \vec{s} , скорость \vec{v} и её приращение $\Delta \vec{v}$, ускорение \vec{a} , – направлены по одной прямой.



Рис.24.2. Огневой старт ракеты. Скорость ракеты увеличивается.

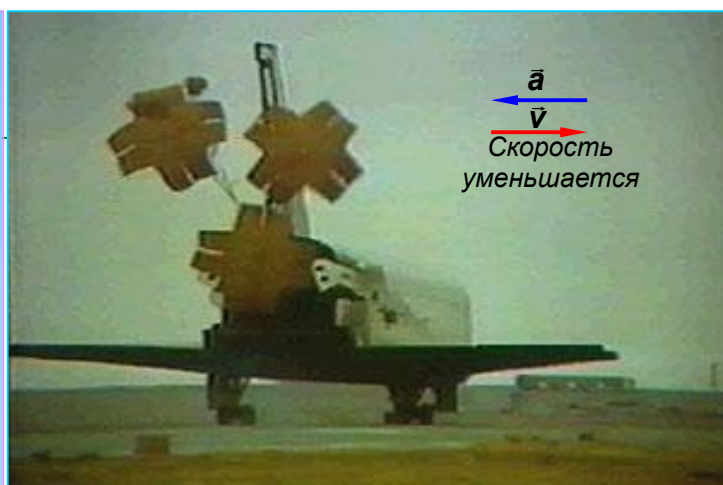


Рис.25.2. Торможение космического корабля «Буран». Скорость корабля уменьшается, движение его замедленное

Движение, при котором ускорение остаётся постоянным по модулю (величине) и направлению ($\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \text{const} \neq 0$), называют **равнопеременным**. Равнопеременное прямолинейное движение является частным случаем неравномерного движения.

Если направление ускорения \vec{a} совпадает с направлением вектора скорости \vec{v} точки, движение называется **равноускоренным**. В этом случае модуль скорости с течением времени возрастает.

Если направления векторов \vec{v} и \vec{a} противоположны, движение называется **равнозамедленным**. В этом случае модуль скорости с течением времени уменьшается.

В этом случае рассматриваются лишь *проекции* векторов на прямолинейную ось OS, по которой совершается движение. При этом проекции (v_s ; a_s) считаются положительными, если направления вектора и оси совпадают и отрицательными, если эти направления противоположны.

Равноускоренно движутся падающие на Землю тяжёлые предметы (вспомните опыты Галилея, бросавшего шары с башни в г. Пизе, см. «Введение») Тело, брошенное вверх, сначала поднимается, равномерно уменьшая свою скорость; затем на мгновение останавливается и начинает равноускоренно падать. При этом ускорение всегда $=9,8 \text{ м/с}^2$ и направлено вертикально вниз. скорость же сначала направлена вверх, а потом вниз.

Почти равноускоренно движется ракета после сразу старта, рис. 24.2. Торможение происходит при посадке космического корабля, рис. 25.2.

В примере на рис. 26.2-28.2 каждую секунду скорость увеличивается на 2 м/с. Это равноускоренное движение совершается с ускорением $a=2 \text{ м/с}^2$. Приблизительно так увеличивается скорость автомобиля при разгоне с места.

В примере на рис 29.2-31.2 каждую секунду скорость уменьшается на 2 м/с. Это равнозамедленное движение совершается с ускорением $a=2 \text{ м/с}^2$.

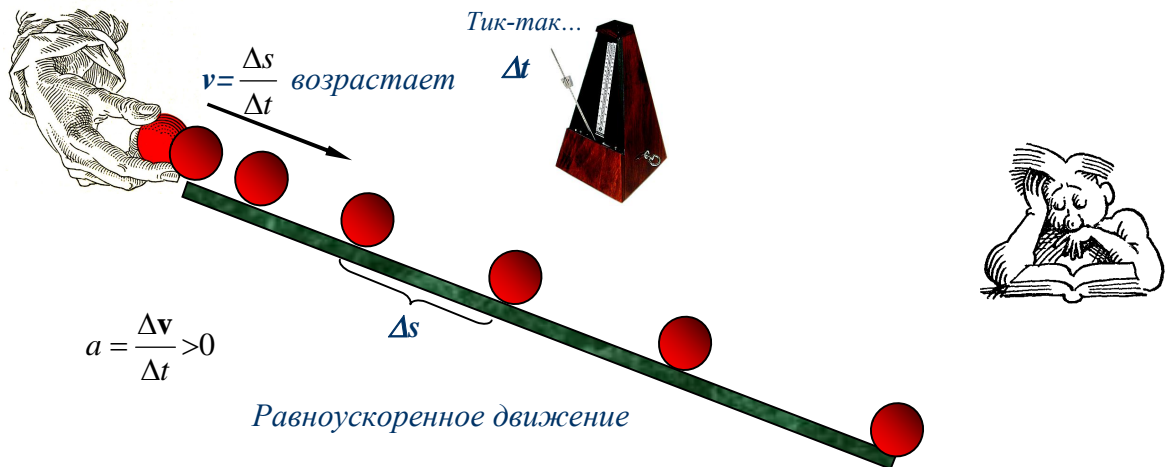
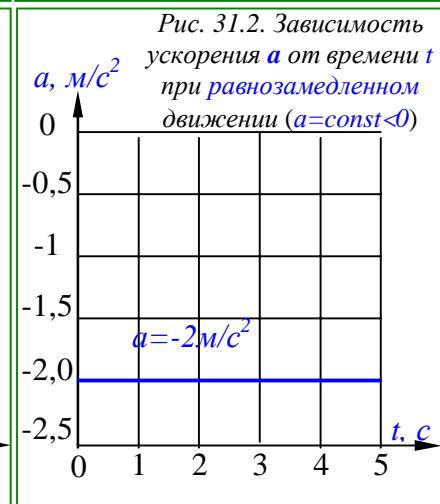
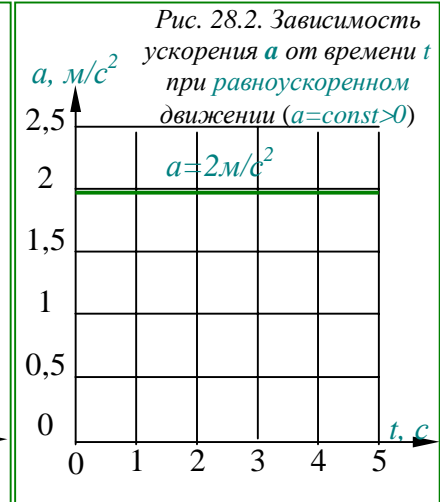
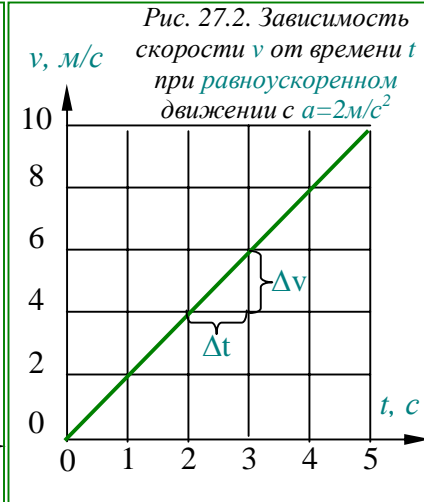
При вычислении величины мгновенного (истинного) ускорения \vec{a} , мы вновь встречаемся с *производной*. Но теперь это производная \vec{v}' от функции $\vec{v}(t)$ по времени t .

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad [2.2^{**}]$$

Мгновенное значение ускорения \vec{a} для наиболее общего случая движения не по прямой линии представляет собой производную от вектора скорости \vec{v} по времени t .

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad [2.2^{**}],$$

но с такими производными от вектора вы познакомитесь в будущем.



§ 21; (17). ИНЕРЦИЯ



Галилей Галилео (1564 – 1642) итальянский физик, астроном. Впервые применил метод экспериментальных исследований в науке. Ввёл понятие инерции, установил относительность движения. Открыл законы падения тел и качания маятника. Впервые применил телескоп для астрономических исследований. Открыл множество новых звёзд, спутники Юпитера, солнечные пятна, фазы Венеры, вращение Солнца, исследовал строение лунной поверхности. Галилей активно поддерживал запрещённую католической церковью гелиоцентрическую систему Коперника. Гонения со стороны инквизиции омрачали последние десять лет жизни великого учёного.

Наблюдения и опыты показывают, что *скорость тела сама по себе измениться не может* ($\vec{v} = \text{const}$). *Изменение скорости тела (по величине или направлению) может произойти только при действии на него другого тела.* Разберёмся в этом подробнее.

Если тело покоится (т. е. имеет нулевую скорость $v=0$), оно не начнет двигаться, пока на него не подействуют другие тела.

Футбольный мяч лежит на поле. Ударом ноги футболист приводит его в движение.

Пуля, вложенная в ружье, не вылетит до тех пор, пока ее не вытолкнут пороховые газы.

Таким образом, и мяч, и пуля не меняют свою *скорость*, пока на них не подействуют другие тела.

Уменьшение скорости движения и остановка тела тоже не происходят сами собой, а вызываются действием на движущееся тело других тел.

Мяч, катящийся по земле, останавливается из-за трения о землю.

Пуля, прошедшая сквозь доску, уменьшает свою скорость от действия на неё доски.

Изменение направления скорости также происходит под действием какого-либо другого тела, *рис. 32.2.*

Теннисный мяч меняет направление движения после удара о ракетку.

Но как же избавиться от действия других тел? Полностью это сделать невозможно, но можно проследить, как влияет на движение тела *постепенное уменьшение* воздействий на него. А это позволит понять, что будет в *предельном* (но *практически недостижимом!*) случае *полного отсутствия внешних воздействий на тело.*

Опять предельный случай! Но ведь именно подобным образом древние греки пытались вычислять длину окружности $L = \pi \cdot D$ (см. § 3, *рис. 10* во Введении).

Рассмотрим эксперименты, в которых *постепенно устраняются внешние воздействия* на движущееся тело со стороны других тел.



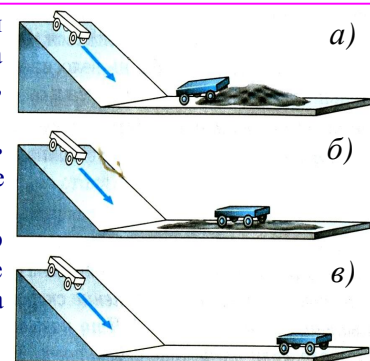
Рис. 32.2. Быстро бегущий человек, чтобы обогнуть дерево, хватается за него рукой

Рис. 33.2. На столе наклонно к нему установлена доска. На небольшом расстоянии от её конца на столе насыпана горка песка. Поместим на наклонную доску тележку. Тележка, скатившись с доски и, попав в песок, очень быстро останавливается (*Рис. 33.2 а*).

Выравнивают песок и вновь отпускают тележку с прежней высоты. Теперь тележка проходит до остановки большее расстояние по столу (*Рис. 33.2, б*). Ее скорость изменяется медленнее, движение становится более равномерным.

Если совсем убрать песок с пути тележки, то препятствием ее движению будет только трение о стол. Тележка до остановки пройдет еще большее расстояние (*Рис. 33.2, в*). Её скорость уменьшается еще медленнее, а движение становится еще более равномерным.

Итак, *чем меньше действие другого тела на тележку, тем дольше сохраняется скорость ее движения и тем ближе это движение к равномерному.* Таким образом, вывод о равномерном прямолинейном движении тела при отсутствии сил Галилей получил, не просто ставя опыты, но и используя воображение, как средство исследования. Такое исследование называется **мысленным экспериментом**.



Впервые подобные опыты по изучению движения были проведены **Г. Галилеем**.

Так было установлено, что *если на тело не действуют другие тела, то оно находится в покое, или движется прямолинейно и равномерно.* В обоих случаях *скорость тела не изменяется*: покой является частным случаем прямолинейного равномерного движения, когда его скорость равна нулю.

Итак, *если на тело не действуют другие тела, оно движется с постоянной по величине и направлению скоростью*. Такое движение называют *инерциальным*¹, рис.34.2.

Это и есть *закон инерции* Галилея.

Инерция – это способность свободного от всяких внешних воздействий тела двигаться прямолинейно и равномерно. Инерция есть неотъемлемое свойство каждой частички во Вселенной. Но к *абсолютно свободному, инерциальному движению можно лишь приблизиться*, устраняя внешние воздействия других тел. Это *предельное* состояние движения тела.

Закон инерции является фундаментом, на котором покоится все учение о движении тел.



Рис. 34.2. Маленький Мука, оказавшийся в космическом пространстве, летел бы вечно, с постоянной скоростью, по прямой линии. . .

Попробуйте представить себя на месте Маленького Мука. Он *абсолютно свободен*. Это значит, что он не ощущает никакого движения: в пространстве все точки одинаковы и направления одинаковы тоже. Вокруг нет никаких предметов. *Ничего* не происходит – он *не ощущает время*. *Ведь абсолютная свобода – это отсутствие каких-либо взаимодействий с чем-либо*. Хорошо ли Маленькому Муку?

Вопросы



1. В результате чего меняется скорость тела? Приведите примеры.
2. Чем вызывается изменение направления движения?
3. Опишите опыт, показывающий, как изменяется движение тела при уменьшении действия препятствий.
4. Что называется инерцией?
5. Как движется тело, если на него не действуют другие тела?



Рис. 35.2,а. Барон Мюнхгаузен рассказывает про следующий «правдивый случай», происшедший с ним. Он разбежался, чтобы прыгнуть через болото. Во время прыжка он заметил, что не допрыгнет до противоположного берега. Тогда прямо в воздухе он повернул обратно и возвратился на берег, с которого прыгал. Почему это невозможно?

Рис. 35.2,б. Почему птица, пролетая над болотом, легко может поменять свою скорость по величине и направлению, развернувшись в любую сторону, а барон Мюнхгаузен, перепрыгивая болото, сделать этого не смог?



Оказывается всё дело в том, что птица в полёте *взаимодействует с другим телом* – воздухом, который её окружает. Она *опирается* на него крыльями. У барона Мюнхгаузена крыльев нет, поэтому окружающий воздух лишь несколько замедляет его свободный полёт, но опереться и оттолкнуться от него он не может.

§ 22;(19). МАССА ТЕЛА – МЕРА ЕГО ИНЕРТНОСТИ, ПРОЯВЛЯЮЩАЯСЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТЕЛ

Раздел механики, в котором изучается механическое движение тел, но не рассматриваются какие-либо воздействия на эти тела других тел, называется кинематикой.

Закон инерции Галилея утверждает, что *свободное от внешних воздействий тело сохраняет свою скорость* (по величине и направлению), но ничего не говорит о том, сколь «настойчиво», инертно оно это делает. Он *не оценивает инерцию тел количественно*.

Раздел механики, в котором изучается влияние взаимодействий между телами на их механическое движение, называется динамикой. В динамике количественно учитывается инертность, *масса* тел.

¹ Инерция – от латинского слова *инерциа* – *неподвижность, бездеятельность*.

Ударом ноги нетрудно привести в движение футбольный мяч. Но попробуйте сделать это с лежащим на земле автомобильным колесом!

Едва ли вам удастся сдвинуть с места стоящий на рельсах вагон, если это не игрушечная железная дорога.

Легко можно остановить катящийся по земле мяч, но трудно остановить приближающийся автомобиль, даже если у него выключен двигатель.

Чем больше масса тела, тем труднее изменить его скорость (покой – нулевую скорость).

Достаточно дуновения, чтобы начала двигаться игрушечная яхта, или улетели ранее покоящиеся пылинки. А как легко изменяют свою скорость пушинки одуванчика, снежинки или мыльные пузыри (рис. 36.2)!

Масса – это мера инертности (инерции) тела. Масса положительная скалярная физическая величина обозначается буквой m или M . Массой обладает каждая частица во Вселенной.



Рис. 36.2. Мыльные пузыри, и другие легкие предметы очень легко изменяют свою скорость.



Рис. 37.2. Какое из этих тел обладает большей инертностью, и что это значит?

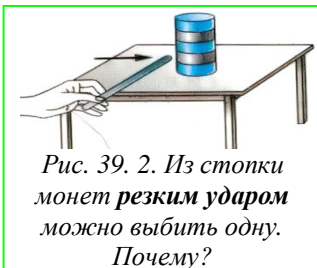


Рис. 39.2. Из стопки монет резким ударом можно выбить одну. Почему?



Рис. 40.2. Если лист бумаги резко выдернуть, стакан с водой останется на месте. Почему?

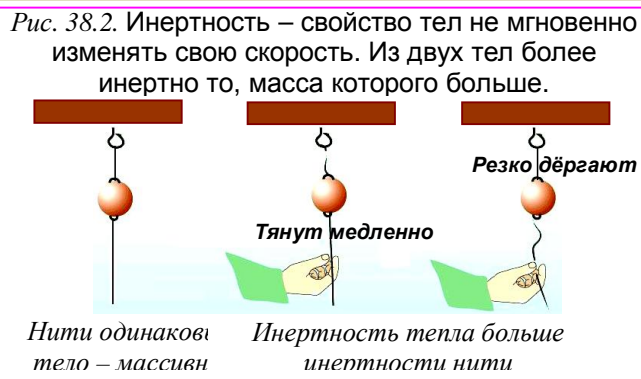


Рис. 38.2. Инертность – свойство тел не мгновенно изменять свою скорость. Из двух тел более инертно то, масса которого больше.

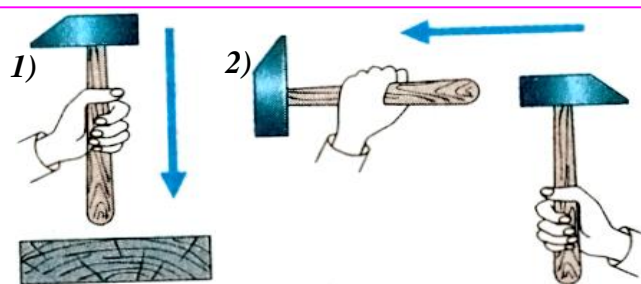


Рис. 41.2. Существует два способа насадки молотка на ручку. Дайте им объяснение.

Рис. 42.2. На грудь лежащему человеку ставят тяжёлую наковальню, а другой человек резко бьёт по наковальне молотком. Лежащий боли не испытывает. Но если наковальню надавить ладонью, лежащему больно. Объясните, в чём дело?



Рис. 43.2. Если резко выбить картон, шарик упадёт в воду. Почему?

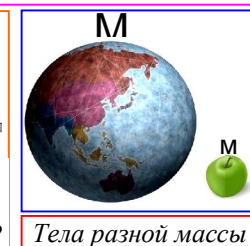


Рис. 44.2. Тела разной массы



Вопросы

1. Что характеризует масса тела? Какое тело легче меняет свою скорость?
2. Что такое инертность тела? Дайте определение массы тела.
3. Почему боксёров делят по весовым категориям?
4. Объясните изображения на рис. 38.2 – 43.2.

§ 23; (20). ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ТЕЛА НА ВЕСАХ

На практике массу тела можно определить с помощью **весов**.

Весы бывают различного типа: учебные, медицинские, аналитические, аптекарские, электронные и др.

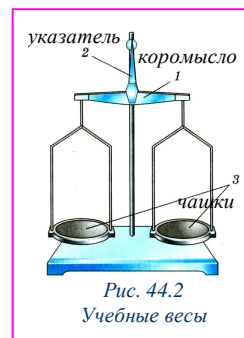


Рис. 44.2. Учебные весы

На рис. 44.2; (48) изображены учебные весы. Их главной частью является **коромысло** (1). К середине коромысла прикреплена стрелка - **указатель** (2), которая движется вправо или влево. К концам коромысла подвешены **чашки** (3). При взвешивании используется специальный набор гирь (рис. 45.2; (49)).

Различные весы предназначены для взвешивания разных тел, как очень тяжелых, так и очень легких. Так, например, с помощью вагонных весов можно определить массу вагона от 50 т до 150 т. Массу комара, равную 1 мг, можно узнать с помощью аналитических весов.

Если весы находятся в равновесии, это значит, что массы тел, лежащих на чашках весов, равны друг другу.

На одну чашку весов поместим тело, массу которого необходимо узнать. На другую будем ставить гири, массы которых известны, до тех пор, пока весы не окажутся в равновесии. В этом случае масса взвешиваемого тела будет равна общей массе гирь.



Рис. 45.2 Набор гирь для учебных весов

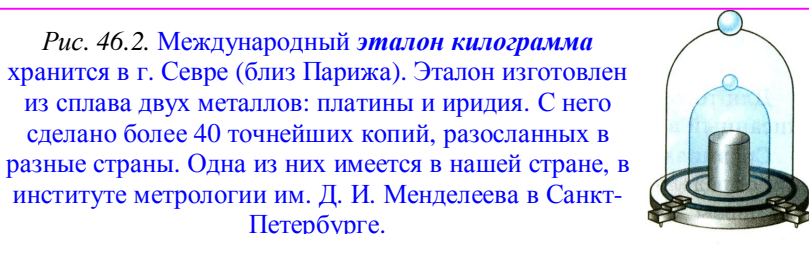


Рис. 46.2. Международный эталон килограмма хранится в г. Севре (близ Парижа). Эталон изготовлен из сплава двух металлов: платины и иридия. С него сделано более 40 точнейших копий, разосланных в разные страны. Одна из них имеется в нашей стране, в институте метрологии им. Д. И. Менделеева в Санкт-Петербурге.

За единицу массы в СИ принят **килограмм** (1 кг), рис. 46.2; (47).

На практике используют и другие единицы массы: **тонна** (т), **грамм** (г), **миллиграмм** (мг).

$$1 \text{ т} = 1000 \text{ кг} (10^3 \text{ кг}); \quad 1 \text{ г} = 0,001 \text{ кг} (10^{-3} \text{ кг})$$

$$1 \text{ кг} = 1000 \text{ г} (10^3 \text{ г}); \quad 1 \text{ мг} = 0,001 \text{ г} (10^{-3} \text{ г})$$

$$1 \text{ кг} = 1\,000\,000 \text{ мг} (10^6 \text{ мг}); \quad 1 \text{ мг} = 0,000001 \text{ кг} (10^{-6} \text{ кг})$$

Современные электронные весы не нуждаются в гирях, рис. справа.

Современная физика располагает совершенными способами измерений, которые позволяют с большой точностью определять размеры и массы мельчайших частиц вещества - молекул. Наименьшую массу имеет молекула водорода H_2 . Ее масса равна 0,000 000 000 000 000 000 000 0033 г, или $3,3 \cdot 10^{-24}$ г. Если кончиком тонко отточенного карандаша нанести на бумагу точку, то масса графита, оставшегося на бумаге, будет в миллионы раз больше массы этой молекулы.

Масса молекулы ртути Hg в 100 раз, кислорода O_2 - в 16 раз, воды H_2O - в 9 раз больше массы молекулы водорода H_2 .



Современные электронные учебные весы

Вопросы



1. Каково условие равновесия учебных весов?
2. Как можно определить массу тела при помощи весов и набора гирь?

§ 24 (21). ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА

Часто используется понятие «**плотность вещества**». **Плотность вещества равна массе единицы объёма этого вещества.**

Тела, окружающие нас, состоят из различных веществ: **дерева, железа, резины** и т. д.

Масса тела зависит не только от его размеров, но и от того, из какого вещества оно состоит. Тела, имеющие **равные объёмы V** , но состоящие из **разных веществ**, имеют **разные массы m** .

Взвесив два цилиндра **равного объёма**, но один из алюминия, а другой из свинца убедимся, что масса алюминиевого цилиндра почти в 4 раза меньше массы свинцового (рис. 47. 2).

В то же время тела **с равными массами m** из **разных веществ**, имеют **разные объёмы V** .

Так, железный брус массой 1 т занимает объём $0,13 \text{ м}^3$, а лед массой 1 т - объём $1,1 \text{ м}^3$. Это почти в 9 раз больше объёма железного бруса (рис. 48. 2).

Из примеров видно, что **масса 1 м^3 разных веществ различна**. А это значит, что вещества отличаются друг от друга своими **плотностями**.



Рис. 47. 2

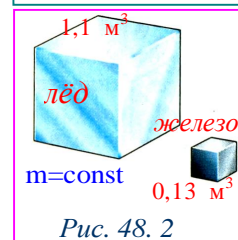


Рис. 48. 2

Плотность показывает, чему равна масса 1 м³ вещества.

Например, масса 1 м³ железа равна 7800 кг, значит, плотность железа составляет 7800 кг на 1 м³.

1 м³ алюминия имеет массу 2700 кг; 1 м³ свинца – массу 11 300 кг. Значит, плотность алюминия 2700 кг на 1 м³; плотность свинца 11 300 кг на 1 м³ и т. д.

Плотность вещества обозначают греческой буквой - ρ (читается: «ро»). Плотность вещества найти очень просто, если известен его объём V и масса m .

Пример. Мраморная плита имеет объём $V = 2 \text{ м}^3$, а ее масса $m = 5400 \text{ кг}$. Определите плотность мрамора. Следовательно, 1 м³ мрамора будет иметь массу в 2 раза меньшую, т. е. $5400 : 2 = 2700 \text{ кг}$. Таким образом, плотность мрамора будет равна 2700 кг на 1 м³.

Итак, чтобы найти плотность вещества ρ , надо массу тела m разделить на его объём V :

$$\text{плотность} = \frac{\text{масса}}{\text{объём}}, \text{ или } \rho = \frac{m}{V} \quad [3.2].$$

Единицей плотности вещества в СИ является **килограмм на кубический метр** $1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Плотность вещества выражают очень часто и в **граммах на кубический сантиметр**

$$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \text{ (рис. 49. 2).}$$

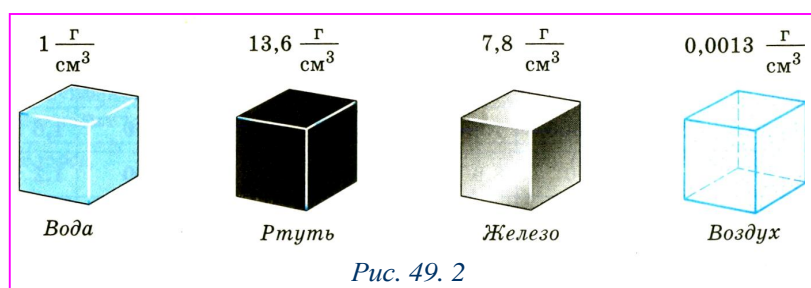


Рис. 49. 2

Если плотность вещества выражена в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, то ее можно перевести в $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Пример. Плотность серебра 10 500 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Выразим ее в $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Для этого переведем килограммы в граммы, а кубические метры в кубические сантиметры:

$$10\,500 \text{ кг} = 10\,500\,000 \text{ г (или } 10,5 \cdot 10^6 \text{ г),}$$

$$1 \text{ м}^3 = 1\,000\,000 \text{ см}^3 \text{ (или } 10^6 \text{ см}^3).$$

$$\text{Тогда } \rho = 10\,500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \frac{10,5 \cdot 10^6}{10^6} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 10,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Следует помнить, что **плотность одного и того же вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях различна**. Так, плотность льда равна 900 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ воды 1000 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, водяного пара 0,590 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Ниже приведены таблицы плотностей некоторых **твердых тел, жидкостей и газов**.

Ниже приведены таблицы плотностей некоторых **твердых тел, жидкостей и газов**.

Таблица 2

Плотности некоторых **твердых тел** (при нормальном атмосферном давлении, $t = 20^\circ\text{C}$)

Твердое тело	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³	Твердое тело	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³
Осмий	22600	22,6	Мрамор	2700	2,7
Иридий	22400	22,4	Стекло оконное	2500	2,5
Платина	21500	21,5	Фарфор	2300	2,3
Золото	19300	19,3	Бетон	2300	2,3

Свинец	11300	11,3	Кирпич	1800	1,8
Серебро	10500	10,5	Сахар-рафинад	1600	1,6
Медь	8900	8,9	Оргстекло	1200	1,2
Латунь	8500	8,5	Капрон	1100	1,1
Сталь, железо	7800	7,8	Полиэтилен	920	0,92
Олово	7300	7,3	Парафин	900	0,9
Цинк	7100	7,1	Лед	900	0,9
Чугун	7000	7,0	дуб (сухой)	700	0,7
Корунд	4000	4,0	Сосна (сухая)	400	0,4
Алюминий	2700	2,7	Пробка	240	0,24

Таблица 3.

Плотности некоторых жидкостей (при нормальном атмосферном давлении, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Жидкость	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³	Жидкость	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³
Ртуть	13600	13,60	Керосин	800	0,80
Серная кислота	1800	1,80	Спирт	800	0,80
Мед	1350	1,35	Нефть	800	0,80
Вода морская	1030	1,03	Ацетон	790	0,79
Молоко цельное	1030	1,03	Эфир	710	0,71
Вода чистая	1000	1,00	Бензин	710	0,71
Масло подсолнечное	930	0,93	Жидкое олово (при $t = 400^{\circ}\text{C}$)	6800	6,8
Масло машинное	900	0,90	Жидкий воздух (при $t = -194^{\circ}\text{C}$)	860	0,86

Таблица 4

Плотности некоторых газов (при нормальном атмосферном давлении, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Газ	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³	Газ	ρ , кг/м ³	ρ , г/см ³
Хлор	3,210	0,00321	Оксид углерода (II) (угарный газ)	1,250	0,00125
Оксид углерода (IV) (углекислый газ)	1,980	0,00198	Природный газ	0,800	0,0008
Кислород	1,430	0,00143	Водяной пар (при $t = 100^{\circ}\text{C}$)	0,590	0,00059
Воздух (при 0°C)	1,290	0,00129	Гелий	0,180	0,00018
Азот	1,250	0,00125	Водород	0,090	0,00009

Вопросы



1. Как можно найти плотность вещества?
2. Какой буквой обозначают плотность?
3. Какова единица плотности в СИ?
4. Какие еще единицы плотности вам известны?

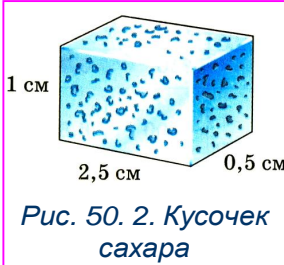


Упражнение

1. В *таблице 2* дана плотность редкого металла осмия: $22\ 600\text{кг/м}^3$. Что это означает?

2. Пользуясь таблицами плотностей (табл.2, 3), определите, плотность какого вещества больше: цинка или серебра; бетона или мрамора; бензина или спирта.

3. Три кубика - из мрамора, льда и латуни имеют одинаковый объем. Какой из них имеет большую массу, а какой - меньшую?



4. Самое легкое дерево – бальза. Масса его древесины равна 12 г при объеме 100 см^3 . Определите плотность древесины в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

5. Кусочек сахара имеет размеры: $a = 2,5\text{ см}$, $b = 1\text{ см}$, $c = 0,5\text{ см}$ (рис. 53). Его масса равна 0,32 г. Определите плотность сахара. Проверьте полученный результат по таблице 4.

§ 25 (22). РАСЧЕТ МАССЫ И ОБЪЕМА ТЕЛА ПО ЕГО ПЛОТНОСТИ

Знать плотность веществ очень важно для различных практических целей. Инженер, создавая машину, заранее по плотности и объему материала может рассчитать массу будущей машины. Строитель может определить, какова будет масса строящегося здания.

Следовательно, зная плотность вещества и объем тела, всегда можно определить его массу.

Поскольку плотность любого вещества определяют по формуле $\rho = \frac{m}{V}$, то отсюда можно найти массу, т. е.

$$m = \rho V. \quad [4.2]$$

Чтобы вычислить массу тела m , если известны его объем V и плотность ρ , надо плотность умножить на объем.

Пример. Определим массу стальной детали объемом 120 см^3 .

По *таблице 2* находим, что плотность стали равна $7,8\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	Решение:
$V = 120\text{ см}^3$	$m = \rho V; m = 120\text{ см}^3 \cdot 7,8\frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 936\text{ г}.$
$\rho = 7,8\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	
$m = ?$	Ответ: $m = 936\text{ г}$

Если известна масса тела и его плотность, то объем тела можно выразить из формулы

$$m = \rho V,$$

т. е. объем тела будет равен:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad [4.2, a]$$

Чтобы вычислить объем тела V , если известна его масса m и плотность ρ , надо массу разделить на плотность.

Пример: Масса подсолнечного масла, заполняющего бутылку, равна 930 г. Определим объем бутылки.

По таблице 3 находим, что плотность подсолнечного масла равна $0,93\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$$\rho = 0,93 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$m = 930 \text{ г}$$

$$V = ?$$

Решение:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{930}{0,93} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1000 \text{ см}^3 = 1 \text{ л}$$

Ответ: $V=1 \text{ л}$

Для определения объема пользуются формулой, как правило, в тех случаях, когда объем сложно найти с помощью простых измерений.



Вопросы

1. Как вычисляется масса тела по его плотности и объему?
2. По какой формуле можно определить объем тела?



Упражнение

1. Какова масса 0,5 л спирта, молока, ртути?
2. Определите объем льдинки, масса которой 108 г.
3. Сколько килограммов керосина входит в пятилитровую бутылку?
4. Грузоподъемность лифта 3 т. Сколько листов железа можно погрузить в лифт, если длина каждого листа 3 м, ширина 60 см и толщина 4 мм?



Задание

Возьмите баночку из-под меда. Рассмотрите внимательно этикетку. Найдите на ней, какова масса меда и объем баночки. Затем рассчитайте плотность меда. Полученный результат проверьте по **таблице 3**.

Некоторые дополнительные сведения

1. Почему, если рассматривать одно и то же вещество в разных агрегатных состояниях, плотность его будет разной? (см. §§ 11, 12).

У **твердого тела** атомы прочно связаны друг с другом и очень плотно упакованы. Поэтому вещество, находящееся в твердом состоянии имеет наибольшую плотность.

В **жидком состоянии** плотность упаковки атомов и молекул по-прежнему высока, поэтому плотность вещества находящегося в жидком состоянии не очень сильно отличается от твердого состояния.

У **газов** молекулы имеют очень слабую связь друг с другом и удаляются друг от друга на большое расстояние. Плотность упаковки очень низкая, соответственно, вещество в газообразном состоянии обладает небольшой плотностью. При переходе вещества в газообразное состояние его плотность уменьшается примерно в 1000 раз.

2. Обычно **твердые тела тонут в своих расплавах**.

Например, кусок сливочного масла утонет в топленом масле, железный гвоздь утонет в расплавленном железе. Значит плотность этих твердых веществ больше плотности их расплавов.

Но, нет правил без исключения!

Образующийся зимой **лед не тонет**, а плавает на поверхности воды, т.к. плотность льда меньше плотности воды. Иначе все водоемы зимой наполнились бы льдом и в них не могли бы существовать живые организмы. Весь окружающий нас мир был бы совершенно другим.

3. **Космическое пространство чрезвычайно разрежено**.

Основываясь на данных глубоких обзоров галактик, можно определить среднюю плотность вещества во Вселенной. Если мысленно равномерно «размазать» вещество по всему объему нашей Галактики, то средняя плотность материи в ней окажется равной примерно



0,000 000 000 000 000 000 000 5 кг/м³. Расстояния между небесными телами (звёздами, планетами) чрезвычайно велики по сравнению с их размерами (см. рис. 1* и 3* во Введении).

В среднем на один кубический метр пространства Вселенной приходится несколько атомов.

В микромире дело обстоит аналогичным образом: размеры частиц, из которых состоят атомы различных веществ, тоже очень малы по сравнению с расстояниями между ними.

4. **Земная кора** состоит из слоев вещества различающихся по плотности. Средние значения плотности земной коры и Земли в целом составляют, соответственно, 2700 и 5520 кг/м³.

5. **В основном человек состоит из жидкости.** Средняя плотность тела человека 1 г/см³ или 1 кг/л. Из этого следует, что масса человека в килограммах численно равна объему его тела в литрах. Например, **ученик массой 50кг имеет объем тела около 50 литров.** Именно такой объем воды окажется на полу при погружении его в ванну, заполненную водой до краев.

6. В Италии вблизи Неаполя есть знаменитая «собачья» пещера. В ее нижней части непрерывно выделяется углекислый газ, плотность которого в полтора раза выше плотности воздуха. Газ стелится понизу и медленно выходит из пещеры. Человек беспрепятственно может войти в пещеру, но **для собаки прогулка кончается печально.**

7. Плотность янтаря близка к плотности воды. Это приводит к тому, что **янтарь десятилетиями может находиться в море** как бы во взвешенном состоянии, не давя на дно и не истираясь о песок.

§ 26. КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ (ИМПУЛЬС) ТЕЛА $\vec{p} = m\vec{v}$ – ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕЛА

Количеством движения (импульсом) тела называется векторная величина, равная произведению его массы m и скорости \vec{v} : $\vec{p} = m\vec{v}$. [5.2].

За единицу количества движения (импульса) в СИ принимают 1 кг·м/с. Это импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.

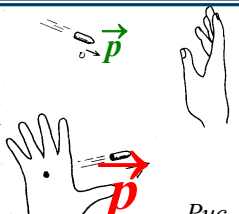


Рис. 51.2

Если кто-то бросит пулю массой 2 грамма, вы легко её поймаете. Но если вы попытаетесь поймать такую пулю, летящую со скоростью 300 м/с, результат будет совсем иным.

Есть что-то такое в большой скорости v движущегося тела, что затрудняет его остановку.

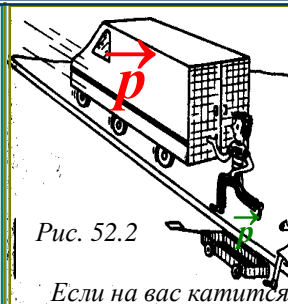


Рис. 52.2

Если на вас катится игрушечная тележка, вы можете остановить ее носком ноги. Если на вас катится грузовик, вам следует убежать.

Есть что-то такое в большой массе m движущегося тела, что затрудняет его остановку.

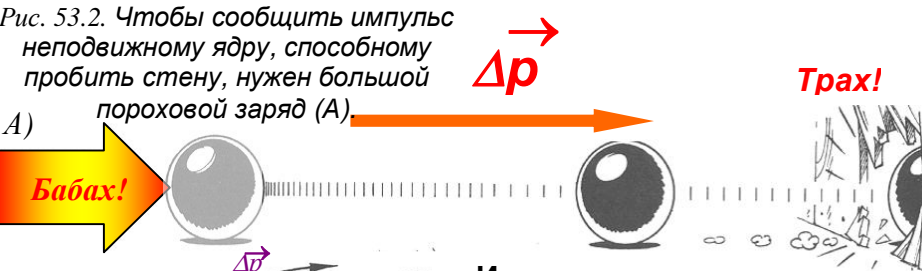
Если на тело не действуют другие тела, (например, при инерциальном движении), его масса не имеет значения m . к. его движение можно характеризовать скоростью $\vec{v} = \text{const}$ – постоянной по величине и направлению.

Но если на тело что-либо действует извне, изменение его скорости будет тем меньше, чем больше его масса. В этом случае согласно Ньютону, «количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе».

Изначальное название «количество движения» и более позднее «импульс» (в переводе с лат. *impulsus* – «толчок») дополняют друг друга, отражая физический смысл величины \vec{p} .

Вектора \vec{p} и \vec{v} по направлению совпадают.

Рис. 53.2. Чтобы сообщить импульс неподвижному ядру, способному пробить стену, нужен большой пороховой заряд (А).



А) **Бабах!**

В) **Фук!**

Изменения импульса тела Δp – есть мера воздействия на него.

Но для покоящегося воздушного шарика, достаточно щелчка, (В).

Импульс (количество движения) \vec{p} – более фундаментальная физическая величина, чем каждая из таких величин, как масса m и скорость v по отдельности, рис.51.2; 52.2; 53.2.

Величина импульса (как и скорости) относительна: она зависит от выбора системы координат.



Вопросы

1. Что такое импульс тела?
2. Что характеризует импульс? Что характеризует изменение импульса?
3. Что нового даёт понятие «импульс» по сравнению с понятиями «скорость»? «масса»?

§ 27. СОХРАНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ (ИМПУЛЬСА) ТЕЛА, СВОБОДНОГО ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.

Поскольку импульс \vec{p} отличается от скорости тела \vec{v} только множителем m , то из закона инерции Галилея следует, что импульс тела, свободного от внешних воздействий, также должен сохраняться:

Импульс тела сам по себе измениться не может, т. е. для тела, свободного от внешних воздействий:

$$\Delta \vec{p} = 0 \text{ или } \Delta m \vec{v} = 0. \quad [6.2]$$

Это обычно формулируют более кратко.

Импульс тела, свободного от внешних воздействий, сохраняется (по величине и направлению):

$$\vec{p} = m \vec{v} = const. \quad [6.2*]$$

Такое движение тела является инерциальным¹.

Закон сохранения импульса, как и закон инерции Галилея, характеризует состояние инерциального движения тела, но учитывает меру его инертности – массу.

Изменить состояние движения тела, обладающее большим импульсом, трудно. Именно поэтому движённые планеты (весьма близкое к инерциальному) продолжается миллиарды лет.

С проявлением инерции и сохранением импульса мы встречаемся постоянно.



Если вагон начинает двигаться от остановки, ноги пассажира также приходят в движение. Но тело его по инерции остается в покое. Поэтому он наклоняется в

сторону, противоположную движению (рис. 54.2, а). Наоборот, при резкой остановке пассажир, продолжая двигаться, наклоняется вперед (рис. 54.2, б).

Если, не производя торможения, выключить двигатель автомобиля, он не сразу остановится. Например, легковой автомобиль, идущий по асфальтированному шоссе со скоростью 50 км/ч, после выключения двигателя пройдет до остановки около 360 м. Это его *путь свободного качения*. Но даже если затормозить колеса автомобиля, прекратив их вращение, то все-таки некоторое время машина будет двигаться, скользя колесами по дороге. Чем машина тяжелее, тем труднее её остановить.

Переходить дорогу перед движущимся транспортом очень опасно, так как машина благодаря своей большой массе (инерции) не может мгновенно остановиться при торможении.



Вопросы

1. Что утверждает закон сохранения импульса свободного тела? В чём его отличие от закона инерции?
2. В какую сторону отклоняются пассажиры относительно автобуса при повороте его вправо? влево? Почему?
3. Почему невозможно мгновенно остановить движущийся поезд, автомобиль, мотоцикл?

¹ Уравнения [6.2] и [6.2]* совершенно равнозначны: если изменение физической величины равно нулю, она сохраняется, остаётся постоянной.

§ 28(18). ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ В ПРИРОДЕ



Рядом легко уживаются мысли,
А вещи в пространстве толкают друг друга.
Шиллер

Природа устроена так, что *любой её объект обязательно взаимодействует с другими объектами*. Свободное (изолированное) от внешних воздействий тело – это *мысленная идеализация*, к которой можно лишь приблизиться, устраняя влияние других тел.

Взаимодействия в природе очень многообразны.

Ветер колеблет листья деревьев и двигает парусную яхту (рис. 55.2); автомобиль преодолевает сопротивление воздуха и трение, отталкиваясь от дороги. Все тела на Земле, самолёт, искусственный спутник испытывают её притяжение. Детали любого механизма, например, часов, взаимодействуют между собой. Планеты притягиваются Солнцем.

Важно иметь в виду, что любое *действие* одного тела на другое *сопровождается его противодействием*. При взаимодействии тела изменяют свою скорость и/или форму.



Рис. 55.2. Стоящий автомобиль взаимодействует с Землёй; его шины деформируются. Плывущая яхта взаимодействует с водой и воздухом. Ветер взаимодействует с деревьями; их ветви изгибаются, листья движутся. Кран стоит на Земле и поднимает груз.

Если на кровать положить чемодан, она прогнется. То, что чемодан давит на кровать, очевидно каждому. Иногда, однако, забывают, что и на чемодан давит кровать. Ведь лежащий на кровати чемодан не падает; это значит, что со стороны кровати на него действует такая же по величине сила, *направленная вверх*. Такое «ответное» действие называют *противодействием*. Действие стола на лежащую на нём книгу, действие кровати на положенный на нее чемодан – это *противодействия опор*.

«Односторонних» воздействий в природе не существует, *реально существуют лишь взаимодействия между телами*. При этом *действие* и *противодействие* равны, они относятся друг к другу как *предмет* и *изображение его в зеркале*, рис.56.2.

Несмотря на огромное количество взаимодействующих объектов, в природе известно только *четыре* вида физических взаимодействий: **гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое**.

В механике встречаются лишь первые два – **гравитационное и электромагнитное**.

Гравитационное взаимодействие заставляет любые тела, обладающие массой, притягиваться друг к другу (см. *Явление всемирного тяготения*, § 32). Оно лежит в основе образования планетных систем, звездных скоплений, заставляет сжиматься вещество в звездах, планетах. Благодаря тяготению тела удерживаются на Земле и падают на Землю. Это взаимодействие осуществляется через **гравитационное поле** (см. §35).

Электромагнитное взаимодействие имеет место между электрическими зарядами и проводниками с электрическим током. Электромагнитное взаимодействие, так же как и гравитационное, осуществляется через поле, но поле это другой природы – оно **электромагнитное**. Электромагнитные явления изучаются в курсах физики 8 и 9 классов. **Слабое и сильное взаимодействия** – взаимодействия между элементарными частицами также будут рассматриваться в старших классах.

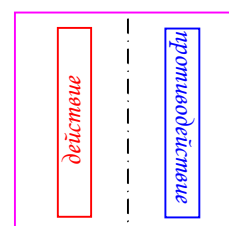


Рис. 56.2. Механическое взаимодействие зеркально симметрично



Взаимодействия бывают разные. Наши взаимодействия с окружающим миром определяют все наши ощущения, нашу жизнь. Выбирайте их. Ведь на каждое наше действие мы получаем ответное действие!

Вопросы



1. Какие разделы механики изучают движение? В чём их различие?
2. Приведите примеры взаимодействий в природе.
3. Что такое «действие» и «противодействие»? Как они связаны?
4. Назовите виды физических взаимодействий. Какие из них встречаются в механике?

§ 29 (23). СИЛА \vec{F} – ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕЙСТВИЯ ОДНОГО ТЕЛА НА ДРУГОЕ

Мерой механического действия на материальную точку (или тело) других тел является **сила**. Сила \vec{F} – векторная физическая величина характеризуется численной величиной (модулем) и направлением. Если сила действует не на материальную точку, а на тело конечных размеров, имеет значение точка приложения силы. Прямая линия, вдоль которой направлена сила, называется линией действия силы.

На тело действует другое тело \equiv на тело действует сила \vec{F}

Значит всё, сказанное о действии одного тела на другое тело, можно сказать о действии на тело силы! Но действие – явление, а сила **векторная физическая величина** – количественная мера, характеристика действия.

«Одиноким» сил в природе не существует, реально существуют лишь силы взаимодействия между каждой парой тел. При этом силы **действия** и **противодействия** неизменно равны, они относятся одна к другой как **предмет** и его **отражение** в зеркале, рис. 57.2.

На рис. 55.2 (слева направо):

действие: «автомобиль» \rightarrow «Земля»; «ветер» \rightarrow «парус», «корпус яхты» \rightarrow «вода»; «ветер» \rightarrow «ветви деревьев»; «кран» \rightarrow «груз»;

противодействие: «Земля» \rightarrow «автомобиль»; «парус» \rightarrow «ветер», «вода» \rightarrow «корпус яхты»; «ветви деревьев» \rightarrow «ветер»; «груз» \rightarrow «кран».

На рис. 58.2: **действие:** «рука» \rightarrow «шар»; **противодействие:** «шар» \rightarrow «рука» (противодействие на рис. не показано).

Таким образом, силы между взаимодействующими телами зеркально симметричны: они встречаются всегда по две и притом равны и направлены противоположно. Эти две силы, приложенные к взаимодействующим телам, и называют обычно **действием** и **противодействием**. Они всегда приложены к **разным** телам.

Не надо путать силы, приложенные к каждому (одному!) из взаимодействующих тел, с силами действия и противодействия, приложенными к разным взаимодействующим телам!

Силы могут быть уравновешены, если они приложены к одному телу.

Например, сила тяжести автомобиля, стоящего на Земле (сила, с которой автомобиль притягивается Землей), **уравновешивается** реакцией опоры – силой, с которой Земля давит на автомобиль, см. крайний левый рис. 55.2. Обе силы действуют на автомобиль (одно тело!).

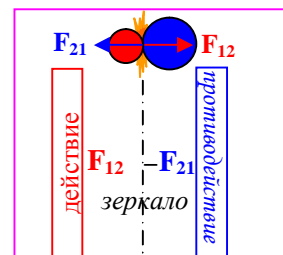


Рис. 57.2.

Механическое взаимодействие тел зеркально симметрично

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

Силы действующая и противодействующая равны по величине, но противоположны



Рис. 58.2. Рука взаимодействует с шаром. Толкая шар, можно сжать пружину.

Если на пружинную кровать положить чемодан, кровать прогнётся. То, что чемодан действует на кровать, очевидно каждому. Но иногда забывают, что и со стороны кровати на него действует сила, равная его весу и направленная вверх.

Обычно на тело действует несколько сил. Чтобы установить, сколько действует на тело **сил**, надо понять, сколько действует на него **тел**. Чтобы не запутаться, всегда следует выделять **пары тел** – «действующее» и «противодействующее».

Если на тело **действует сила**, то тело **изменяет скорость** (приобретает ускорение) **и/или деформируется**.

Тело изменяет свою скорость (приобретает ускорение), если на него действует одна сила или больше сил, которые **не уравновешиваются** (не компенсируют друг друга). При этом скорость может изменяться как по величине, так и по направлению.

Вспомните закон Галилея (см. § 21): **скорость тела сама по себе измениться не может** – она сохраняется ($\vec{v} = \text{const}$).

Например, если движение спутника Земли (за секунду он пролетает около 8 км!) наблюдается в течение непродолжительного времени, можно пренебречь влиянием притяжения Земли и считать его движение **равномерным** и **прямолинейным** ($\vec{v} = \text{const}$). Для **изменения его скорости** используются специальные реактивные двигатели, создающие необходимую **силу тяги**. Это и есть та **одна сила**, которая действует на космический объект с целью коррекции его орбиты.

Другой пример: вверх подброшен мяч, *рис.4.2* (стробоскопическое фото). На него действует единственная сила – притяжение Земли (сила тяжести). Это заставляет мяч равномерно уменьшать свою скорость в **вертикальном** направлении с ускорением $g = -9,8 \text{ м/с}^2$ до нулевого значения. Достигнув максимальной высоты, мяч начинает ускоренно падать (с тем же по величине ускорением $g = 9,8 \text{ м/с}^2$) под действием той же силы.

В § 21 приведено много примеров, когда скорость тела меняется в результате его взаимодействия с другими телами – т. е. вследствие действия на него **силы**.

Если все действующие на тело силы уравновешивают друг друга, то тело не меняет своей скорости, но может деформироваться – изменять свою форму и/или объём, так как в теле при этом возникают **внутренние напряжения**.

Однако часто деформации оказываются столь малыми, что заметить их без специальных исследований невозможно.

Если деформациями можно пренебречь, тело считают твёрдым (абсолютно твёрдым, недеформируемым).

На *рис. 55.2* (первое фото) на земле стоит автомобиль. На него действуют две силы: **сила тяжести** и **сила реакции** Земли. Они равны по величине и противоположны, поэтому **компенсируют** друг друга, «сжимая», деформируя автомобиль. Деформацию корпуса автомобиля заметить трудно, а деформацию шин обычно видно хорошо.

На *рис. 55.2* (второе фото слева) изображена движущаяся с постоянной скоростью яхта. На неё действуют две **равные противоположно направленные** силы: **ветер** (на паруса **по направлению** движения), и **сопротивление воды** – **против** движения. Под действием этих сил корпус, паруса, мачты яхты деформируются.

При усилении ветра нарушается равновесие сил **тяги** и **сопротивления**, яхта увеличивает свою скорость до тех пор, пока это равновесие не будет восстановлено.

На *рис. 55.2* (третье фото слева) **ветер деформирует** ветви деревьев до тех пор, пока их сила упругости – **реакция опоры** не уравновесит силу ветра.

На *рис. 55.2* (крайнее фото справа) кран тянет трос с грузом **вверх**, а сила тяжести – **вниз**. Если груз неподвижен или движется равномерно, эти силы равны и деформируют (растягивают) трос. При ускоренном движении груза эти силы по величине равными не будут.

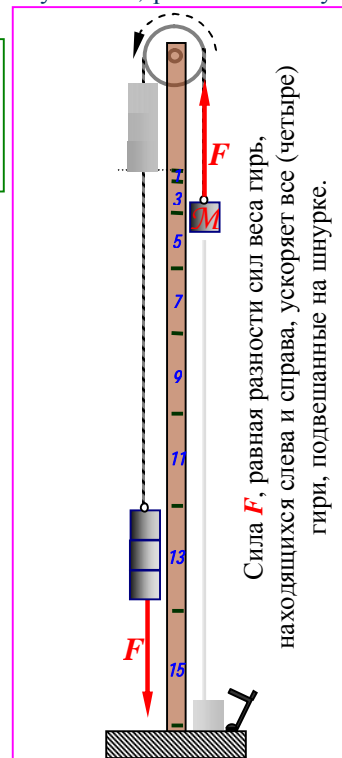


Рис. 59.2. Гири слева тянут тело **M**, подвешенное справа. Чем больше гирек слева – тем больше величина (модуль) силы **F**, приложенной к телу **M**, тем большее ускорение оно получает.

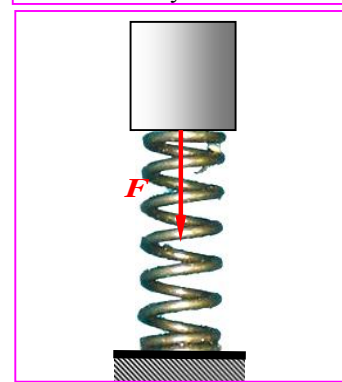


Рис. 60.2. Сила **F** действует на тело – пружину. Чем больше гирька, тем больше сила **F**, тем больше сжатие (деформация) пружины.

На рис. 58.2 на шар действуют две противоположно направленные силы: **рука** и **реакция** пружины. Если они равны, пружина сжата и покоится.

Сила характеризуется: 1) величиной, 2) направлением, 3) точкой приложения.

Величина (модуль) действующей на тело силы определяет величину ускорения или деформации этого тела: чем больше сила – тем больше **ускорение** (рис. 59.2) или **деформация** (рис. 60.2).

Направление действия силы определяет направление изменения скорости (ускорения) или направление деформации тела в пространстве.

Сила сопротивления движению тела направлена против вектора скорости и всегда тормозит движение тела, рис. 31.2, ($a < 0$). Сила тяжести направлена вертикально вниз; она ускоряет движение падающего тела ($g > 0$). При старте самолёта (рис. 15.2, а) или ракеты (рис. 30.2) сила тяги двигателей направлена по направлению движения, так что скорость их возрастает ($a > 0$). Если сила перпендикулярна вектору скорости тела, изменяется только **направление скорости**, а **величина скорости сохраняется**, рис. 83.2; 84.2. Тело движется по **круговой орбите**, а ускорение (**центростремительное**), как и сила, направлено к её центру. Так движутся планеты солнечной системы под действием силы притяжения Солнца.

В зависимости от направления силы, пружину можно сжать или растянуть. Направление ветра определяет направление изгиба ветвей деревьев.

Точка приложения силы, действующей на тело, имеет значение, если, конечно, само тело не является материальной точкой.

В этом можно убедиться, пытаясь удержать молоток, взявшись рукой за край его рукоятки или за её середину, рис. 61.2.

Перемещать высокий предмет на столе лучше, толкая его вблизи плоскости стола, рис. 62.2.

За единицу силы принимают ньютон (1 Н) – силу, которая у тела массой 1 кг вызывает ускорение 1 м/с^2 . Часто применяют и другие единицы - **килоньютон (кН)**, **миллиньютон (мН)**: $1 \text{ кН} = 1000 \text{ Н}$, $1 \text{ Н} = 0,001 \text{ кН}$.

Сила, как количественная характеристика позволяет оценить лишь **гравитационные** и **электромагнитные** взаимодействия. В тех чрезвычайно малых областях пространства и в тех процессах, в которых проявляются **сильные** и **слабые** взаимодействия, такие понятия, как **точка приложения**, **линия действия**, а вместе с ними и само понятие **силы** теряют смысл.

В задачах механики учитываются гравитационные силы (силы тяготения) и две разновидности электромагнитных сил – **силы упругости** и **силы трения**.

Силы взаимодействия между частями рассматриваемой системы тел называют **внутренними**, рис. 63.2.

Силы воздействия на тела данной системы со стороны тел, не включённых в эту систему, называют **внешними** силами.

Система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы, называется **замкнутой** (изолированной) системой.

Итак, воздействие это векторная величина – сила, которая характеризуется величиной, направлением и точкой приложения:

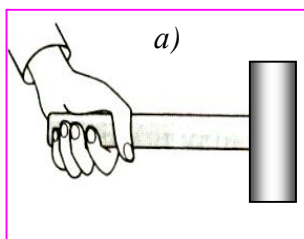


Рис. 61.2. а). Удержать молоток за конец рукоятки труднее, но забить гвоздь проще. б). Так держать молоток удобнее, но забивать гвозди трудно.

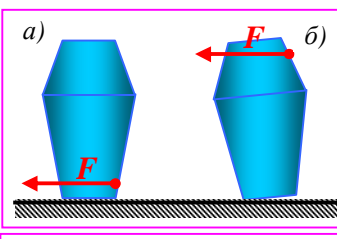
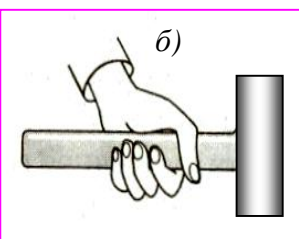


Рис. 62.2. а) Толкая вазу в нижней части, её легко подвинуть. б) Толкая вазу сверху, её легко уронить.



Рис. 63.2. Можно ли себя поднять за волосы? Вы тяните рукой волосы вверх, а голова тянет их вниз. Обе силы приложены к волосам и являются **внутренними**. Они растягивают ваши волосы. Но вас тянет **внешняя** сила – притяжение Земли, на которое вы не влияете, а значит поднять себя не сможете.

Вопросы

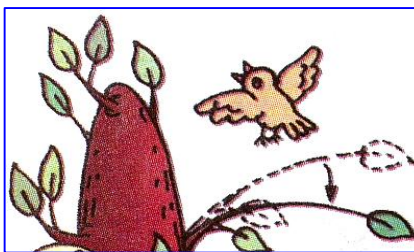


1. Что такое сила? Чем характеризуется сила?
2. Какие силы действуют между взаимодействующими телами? К каким телам они приложены?

3. В каких случаях силы могут уравниваться, компенсировать друг друга? Приведите примеры.
4. Как определить, сколько сил действует на тело?
5. Каков результат действия на тело сил – неуравновешенных, не скомпенсированных? Почему?
6. Каков результат действия на тело сил уравновешенных, скомпенсированных? Почему?
7. Как влияет численная величина (модуль) силы на результат её действия?
8. Как влияет направление действия силы?
9. Как влияет точка приложения силы на результат её действия? Поясните примерами.
10. Когда не имеет смысла говорить о «точке приложения силы»?
11. Что принимают за единицу силы?
12. Какие силы рассматриваются в механике?
13. Какие силы называют внутренними, какие внешними?
14. Что такое замкнутая (изолированная) система тел?



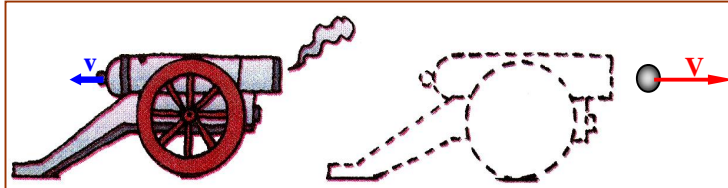
Если сильно ударишь по столу, больно будет тебе. Почему?



Почему, когда птица взлетает с ветки, ветка отклоняется вниз?



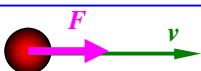
Медведь давит на гамак с большей силой. В каком случае деформация гамака больше?



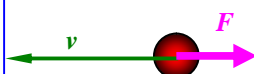
Почему при выстреле пушка откатывается назад?



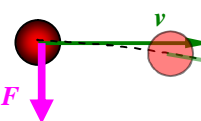
К какой точке надо приложить силу, чтобы, передвигая, не уронить вазу? Почему?



Направления F и v совпадают \rightarrow тело увеличивает скорость



Направления F и v противоположны \rightarrow тело уменьшает скорость



Направления F и v перпендикулярны \rightarrow тело изменяет направление движения в сторону действия силы не меняя величину скорости (при постоянной величине силы движение происходит по окружности).

§ 30. СЛОЖЕНИЕ СИЛ, НАПРАВЛЕННЫХ ПО ОДНОЙ ПРЯМОЙ

Обычно на тело действует сразу несколько сил. Будем считать, что все эти силы действуют по одной прямой.

Так, например, на движущийся корабль действует сила тяги F_T вращающегося винта, силы сопротивления F_c воды и воздуха, сила тяжести $F_{тяж}$ и выталкивающая сила F_A со стороны воды (сила Архимеда – см. §56). На тело, висящее на пружине, действуют две силы: сила тяжести $F_{тяж}$ и сила упругости $F_{упр}$ пружины.

В каждом подобном случае можно заменить несколько сил, в действительности приложенных к телу и действующих по одной прямой, *одной силой, равноценной по своему действию этим силам.*

Силу, которая производит на тело такое же действие, как и несколько одновременно действующих сил, называют равнодействующей R этих сил.

Нахождение равнодействующей нескольких сил называют сложением этих сил или нахождением их суммы. Слагаемые силы иначе называют составляющими силами.

Например, можно считать, что на движущийся корабль действует одна сила – равнодействующая R :

$$R = F_T + F_c + F_{тяж} + F_A.$$

Найдем *равнодействующую R* двух сил F_1 и F_2 , действующих на тело по одной прямой 1) *в одну сторону* и 2) *в противоположные стороны*. Обратимся к опыту.

1) К пружине один под другим подвешивают два груза весом 1 и 2 Н (рис. 64.2, а). Отмечают длину, на которую растянулась пружина. Затем эти грузы снимают и заменяют одним грузом, который растягивает пружину на такую же длину (рис. 64.2, б). Вес этого груза оказывается равным 3 Н.

Основываясь на опыте, заключаем: **равнодействующая R сил, направленных по одной прямой в одну сторону, направлена в ту же сторону, а ее модуль равен сумме модулей составляющих сил F_1 и F_2 .**

На рис. 64.2 показана *равнодействующая* сил, действующих на тело, обозначенная буквой R , и *слагаемые* силы – обозначенные буквами F_1 и F_2 . В этом случае

$$R = F_1 + F_2.$$

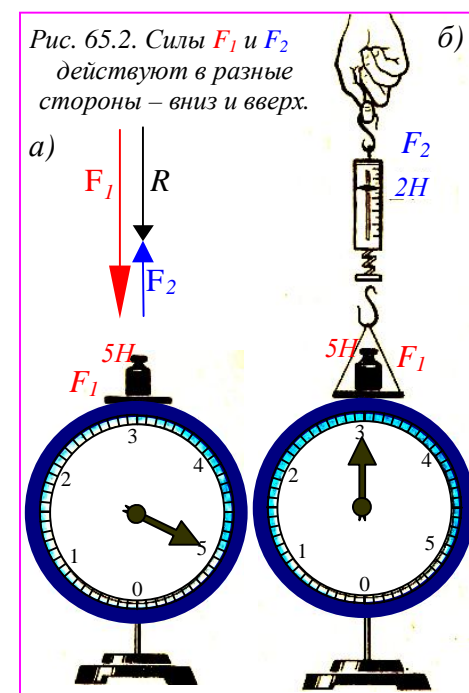
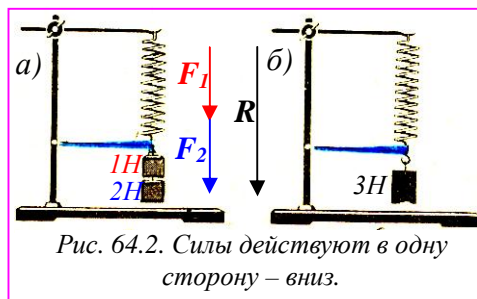
2) Выясним теперь, как найти *равнодействующую* двух сил, направленных по одной прямой *в противоположные стороны*. Для этого на столик динамометра (рис. 65.2, а) поставим груз весом 5 Н. К столику привяжем нитку и, зацепив за нитку другим динамометром, потянем вверх с силой 2 Н (рис. 65.2, б).

Динамометр, на столике которого находится груз, в этом случае покажет силу 3Н, эта сила есть равнодействующая R двух сил: 5 и 2 Н, ее модуль равен разности модулей составляющих сил (3 Н = 5 Н – 2 Н), и *направлена она в сторону большей силы.*

Итак, **равнодействующая R двух сил F_1 и F_2 , направленных по одной прямой в противоположные стороны, направлена в сторону большей по модулю силы, а ее модуль равен разности модулей составляющих сил.**

$$R = F_1 - F_2 \quad (\text{рис. 65.2}).$$

Если к телу приложены две равные и направленные противоположно силы, то равнодействующая этих сил равна нулю. Например, если в нашем опыте за конец нити потянуть силой 5Н, то стрелка динамометра остановится на нулевом делении. Равнодействующая

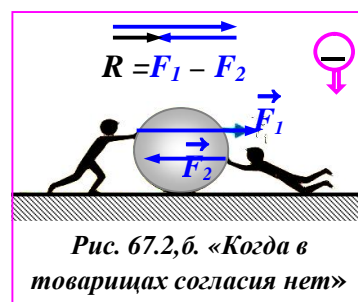
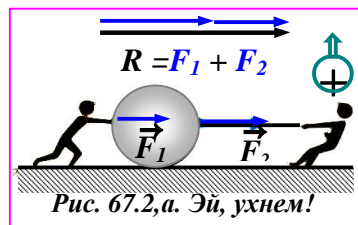
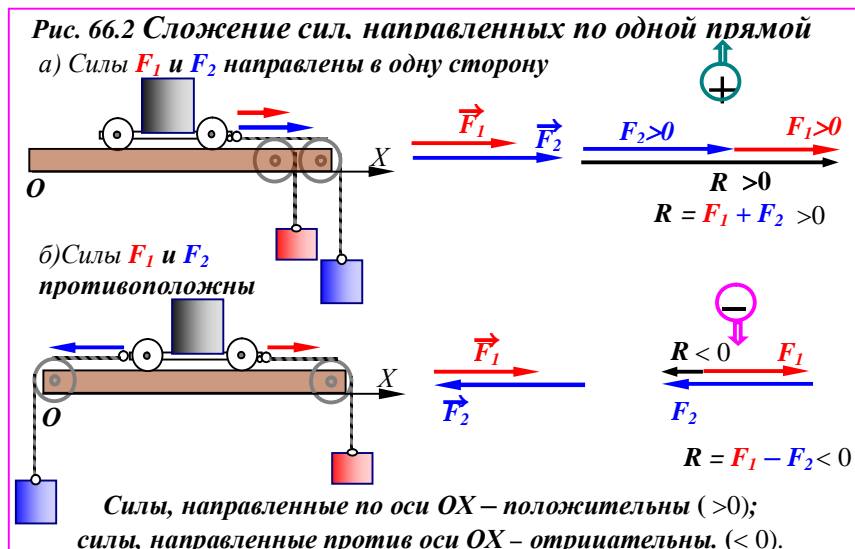


двух сил в этом случае равна нулю ($R = 5 \text{ Н} - 5 \text{ Н} = 0$).

Тело под действием двух равных и противоположно направленных сил будет находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно: эти силы будут взаимно уравновешены, скомпенсированы. $R = 0$

На рис. 66.2 и рис. 67.2 также показано сложение сил F_1 и F_2 , направленных по одной прямой горизонтально. Проанализируйте такое сложение сил самостоятельно.

Таким образом, на чертеже силу изображают стрелкой, длина которой (в масштабе)



соответствует модулю этой силы. Направление сил действующих по одной прямой, можно учитывать знаками «+» или «-». При этом за положительное направление действия сил обычно принимают направление движения тела или направление координатной оси OX , рис. 66.2.



Вопросы

1. Приведите примеры действия на тело нескольких сил.
2. Какую силу называют равнодействующей нескольких сил?
3. Опишите опыт, в котором определяют равнодействующую двух сил, направленных по одной прямой в одну сторону. Чему равна эта равнодействующая?
4. Чему равна равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой в противоположные стороны?
5. Как будет двигаться тело под действием двух равных противоположно направленных сил?
6. Когда говорят, что силы уравновешивают, компенсируют друг друга? Что это означает для тела (в отношении его характера движения и деформации)? Почему?
7. Как изображают силу на чертеже?
8. Как учитывается направление сил, действующих вдоль одной прямой?



Упражнение

1. Человек, масса которого 70 кг, держит на плечах ящик массой 20 кг. С какой силой человек давит на землю?
2. В игре по перетягиванию каната участвуют четыре человека. Два из них тянут канат в одну сторону с силами 330 Н и 380 Н, два – в противоположную сторону с силами 300 Н и 400 Н. В каком направлении будет двигаться канат, и чему равна равнодействующая этих сил? Сделайте чертеж.
3. Человек спускается на парашюте, двигаясь равномерно. Сила тяжести парашютиста вместе с парашютом 700 Н. Чему равна сила сопротивления воздуха?

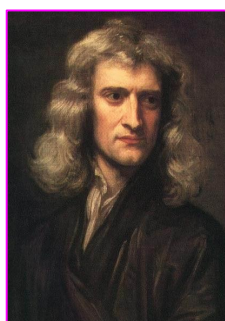
§ 31. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЬЮТОНА – НАЧАЛО СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Галилео Галилей опубликовал свой закон инерции в начале XVII века. До этого на протяжении многих веков в науке господствовала точка зрения древнегреческого ученого Аристотеля и его последователей. Согласно взглядам Аристотеля, при отсутствии внешнего воздействия тело может только покоиться, а для того, чтобы тело двигалось с постоянной скоростью, нужно, чтобы на него непрерывно действовало другое тело.

Галилей пришел к выводу, что *при отсутствии внешних воздействий тело может не только покоиться, но двигаться прямолинейно и равномерно. А сила, которую приходится прикладывать к телу для поддержания его движения, необходима только для того, чтобы уравновесить другие приложенные к телу силы, препятствующие инерциальному движению*, например, силу трения.

Огромная заслуга Галилея состоит в том, что он покончил с многовековым заблуждением, сдерживающим развитие науки.

В конце XVII в. великий английский ученый Исаак Ньютон обобщил выводы Галилея и сформулировал в своём фундаментальном труде «Математические начала натуральной философии»¹ закон всемирного тяготения и три закона динамики², заложившие основы классической механики.



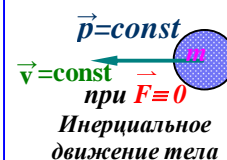
Исаак Ньютон
(1643 – 1727)

§ 31.1. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

И. Ньютон так сформулировал свой 1-й закон механики – закон инерции:

Закон 1: «*Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения (т. е. сохраняет свою скорость и количество движения), пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние*».

1-й закон Ньютона:



Понятию «сила» Ньютон даёт следующее определение: «**Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения**». Это определение сопровождается таким пояснением: «**Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции**».

В основе 1-го закона Ньютона, закона инерции Галилея и закона сохранения импульса изолированного (свободного) тела лежит одна и та же идея: **если на тело не действует сила** (или равнодействующая действующих сил равна нулю), **тело находится в покое или движется с постоянной** (по величине и направлению) **скоростью**, т. е. совершает **инерциальное движение**. И наоборот: **невозможны покой или равномерное прямолинейное (инерциальное) движение тела при действии на него силы**.

Но всегда ли это выполняются?

Находясь в каюте корабля, плывущего по спокойному морю с постоянной скоростью (рис. 68.2,а), невозможно установить, движется ли корабль или стоит на месте. Такое движение корабля является *инерциальным*. На таком корабле (а он является телом отсчёта!) тела, не подверженные действию сил, покоятся или движутся равномерно и прямолинейно. Нарушить их равномерное прямолинейное движение можно только действием силы.

Ещё аналогичный пример. Представим, что мы находимся в самолете, отбывшем из аэропорта на рассвете. Солнце не нагрело еще воздуха, нет «воздушных ям», причиняющих многим пассажирам неприятности.

¹ См.: «Приложение №1 к Главе 2», в котором кратко изложено содержание этой работы И. Ньютона.

² Эти законы были сформулированы Ньютоном для тел, которые можно принять за материальные точки.

Самолет движется плавно, неощутимо, *рис. 68.2,а*. Если не смотреть в иллюминатор, то и не заметишь, что летишь. На свободном кресле лежит книга, на столике покоится яблоко. Все предметы внутри самолета неподвижны.

И в первом и во втором примерах мы рассматривали явления в *системах отсчёта, относительно которых изолированные от внешних воздействий тела движутся равномерно и прямолинейно или покоятся*.

Системы отсчёта, в которых изолированные от внешних воздействий тела движутся равномерно и прямолинейно или покоятся, называют инерциальными системами отсчёта (ИСО).

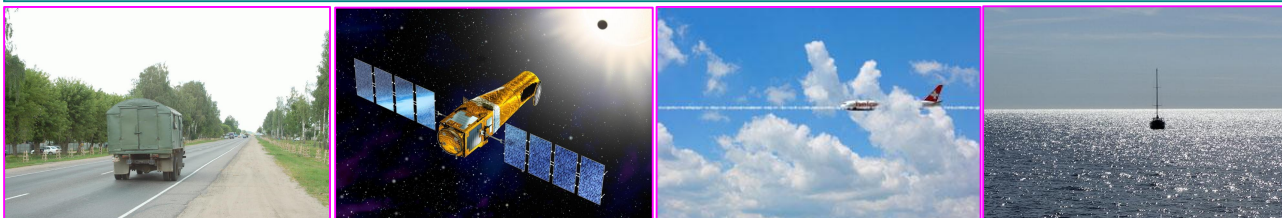


Рис. 68.2,а. Равномерное прямолинейное движение происходит в однородном пространстве. Это ИСО.

Законы движения Галилея и Ньютона в *ИСО* выполняются. Простота и удобства таких систем отсчета очевидны.

Для нас, жителей Земли, чрезвычайно важно то, что система отсчета, связанная с Землей (или с телом, движущимся относительно неё равномерно и прямолинейно), не очень отличается от инерциальной системы.

Дальше (если не будет специальных оговорок) будут использоваться только *ИСО*.

Но если на море шторм, то на корабле происходит что-то странное: все вещи вдруг сами собой приходят в движение, падают, ломаются, хотя никакие другие тела на них не действуют, *рис. 68.2*. Закон инерции Галилея-Ньютона явно не выполняется. В чем же дело? А дело в том, что движение корабля во время шторма является *неинерциальным*.

Второй аналогичный пример. При разгоне самолёта перед взлётом (*рис. 68.2,б*) он резко увеличивает скорость, движется с ускорением. Лежащее перед вами на столике яблоко вдруг покатило назад. То же происходит со всеми незакреплёнными телами. Вас прижимает назад к спинке сиденья, потому что самолёт совершает *неинерциальное* движение.

Системы отсчёта, связанные с телами, подверженными воздействию внешних сил, совершающими *неинерциальное* движение, называются *неинерциальными (НСО)*. В них



Рис. 68.2,б. 1. Так выглядит каюта судна после шторма. 2. Судно в бурю испытывает сильную качку. Это НСО 3. Самолёт разгоняется перед взлётом, движется с ускорением. Это НСО.

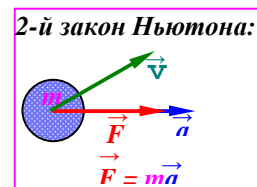
законы движения не выполняются.



Вопросы

1. Что утверждают 1 закон Ньютона, закон инерции Галилея, закон сохранения импульса свободного тела? Сформулируйте основную идею этих законов.
2. Что такое инерциальные и неинерциальные системы отсчёта? Расскажите об их свойствах. Приведите примеры. Почему обычно используют ИСО? В чём преимущество ИСО?

§ 31.2. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА



Второй закон устанавливает, что *величина ускорения \vec{a} , которое получает материальная точка, прямо пропорционально действующей на неё силе \vec{F} , обратно пропорционально массе m точки и по направлению совпадает с действующей силой:*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad [7.2]$$

В такой форме закон справедлив, если масса материальной точки за время действия силы не меняется.

Следует обратить внимание на следующие два обстоятельства.

1. В формуле [7.2] аргументами (*независимыми переменными*) являются *сила \vec{F} и масса m* . Ускорение \vec{a} – их функция (*зависимая от них величина*).

Ускорение, которое получает массивное ядро, вылетая из дула пушки, тем больше, чем больше сила давления не него взрывных газов и меньше масса ядра. Чтобы придать значительное ускорение воздушному шару достаточно легкого щелчка, (рис. 53.2, А и В соответственно). Если вы толкаете тележку, её ускорение будет тем больше, чем больше толкающая её сила (или равнодействующая сил) и меньше её масса.

2. *Направление силы и ускорения всегда совпадают, но направление скорости может быть совсем другим.*

На любое тело (например, мяч) действует *сила тяжести*, направленная *вниз*. Она вызывает направленное *вниз ускорение силы тяжести*, рис.15,2, слева. Но если мяч подкинуть вверх, его *скорость* сначала будет направлена также вверх, а затем, постепенно уменьшаясь, достигнет нулевого значения в самой верхней части траектории рис.15,2, справа. Лишь после этого мяч начнёт падение вниз, постепенно увеличивая свою скорость.

Ньютон сформулировал второй закон в более общей форме:

Закон II. Изменение количества движения $\Delta\vec{p}$ пропорционально приложенной движущей силе \vec{F} , времени её действия Δt и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

В виде формулы это можно записать так (рис. 69.2):

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t \text{ или } \vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}. \quad [7.2, a].$$

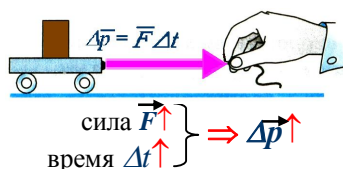


Рис. 69.2. Произведение $\vec{F}\Delta t$ силы \vec{F} на промежуток времени Δt , в течение которого сила действовала на материальную точку, называется **импульсом силы**. Эта величина изменяет её импульс.

Из последней формулы видно, что величина действующей на тело силы \vec{F} определяет быстроту изменения импульса этого тела $\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$; изменение импульса Δp под действием силы F происходит не мгновенно, а за промежуток времени Δt .

Например, из уравнения второго закона для тела с неизменной массой ($\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$) следует, что при $\Delta\vec{v} \neq 0$ не может быть $\Delta t = 0$.

Формулы [7.2] и [7.2,a] – это различные формы написания одного и того же закона, но формулу [7.2] удобнее использовать, если масса тела постоянна ($m = const$), а наиболее общую формулу [7.2,a], когда масса тела за время действия силы изменяется ($m \neq const$).

Например, летящая ракета с работающим реактивным двигателем в результате расхода горючего и окислителя уменьшает свою массу. В подобных случаях следует пользоваться формулой [7.2, a].

Но самое важное в том, что второй закон Ньютона позволяет *по состоянию физической системы в данный момент, определяемому через измеримые величины, предсказать её состояние в любое последующее время*. Это чрезвычайно важное обстоятельство! До Ньютона такие явления, как движение брошенного камня, падение с дерева яблока или движение планет солнечной системы представлялись совершенно неразрешимыми загадками.

Но после открытий Ньютона вдруг *всё стало понятно*. Оказалось, что всё можно очень точно рассчитать: как будет падать яблоко, и как двигались, и как будут двигаться планеты. И даже предсказать то, что пака не удалось увидеть в телескоп. И всё это оказалось абсолютно верным! Это было триумфом человеческого разума. Не случайно на памятнике И. Ньютону в Кембридже высечены слова Лукреция: "*Разумом он превосходил род человеческий*". Открытие Ньютона было *великой революцией в истории естествознания*.

Замечания.

1. Уместно заметить, что первый закон Ньютона *получается* из второго, если положить $F=0$. В этом случае из [7.2, a] следует, что $\Delta p=0$, или $\vec{p}=m\vec{v}=\text{const}$. А это и означает, что скорость тела при отсутствии действующей на него силы остаётся постоянной $\vec{v}=\text{const}$.

Выделение закона инерции в *отдельный*, первый закон обусловлено тем, что он вводит очень важное **понятие свободного, инерциального движения тел**. Ведь законы Ньютона верны только в инерциальных системах отсчёта (ИСО), в которых за тело отсчёта как раз и принимаются *только такие* тела.

Здесь мы опять встречаемся с предельным состоянием, к которому можно лишь приближаться!

2. Для тех, кто разобрался, что такое *производная*, полезно знать, что второй закон Ньютона можно уточнить. Переходя к пределу $\Delta t \rightarrow 0$, формулы [7.2,a] можно переписать так:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \text{ или } d\vec{p} = \vec{F} dt. \quad [7.2a^*]$$

В таком дифференциальном виде этот закон используется в *теоретической физике*.

Справедливость *второго закона* в форме $F=Ma$ можно проверить на экспериментальной установке, изображенной на *рис. 70.2*.

Исследуемая (инертная) масса M равна суммарной массе всех подвижных гирь (которые целесообразно рассматривать как *одно тело*): $M = 3m + m$. Сила F , вызывающая ускорение a , будет равна разности **сил тяжести** (см. § 33) гирь, находящихся слева $F_{тяж1}$ и справа $F_{тяж2}$ от стойки $F = F_{тяж1} - F_{тяж2} = (3m - m)g$. Здесь $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ (см. § 34).

После освобождения гирь (откидывания фиксатора), начинается их равноускоренное движение под действием силы F . Фотосъемка при стробоскопическом освещении (световые вспышки через равные интервалы времени Δt) позволяет определить последовательные положения гирь.

Опыт показывает, что *при любом значении инертной массы M* , проходимые телом в последовательные *равные* промежутки времени Δt , пути ($\Delta S_1=1$; $\Delta S_2=1+2=3$; $\Delta S_3= 3+2=5$; $\Delta S_4=5+2=7$; $\Delta S_5=7+2=9$ и т. д.) и, следовательно, средние скорости ($v_1=\Delta S_1/\Delta t$; $v_2=\Delta S_2/\Delta t$; $v_3=\Delta S_3/\Delta t$; $v_4=\Delta S_4/\Delta t$ и т. д.) относятся между собой как ряд последовательных нечётных чисел (1 ; 3 ; 5 ; 7 ; 9 и т. д.). Иными словами, за каждый последовательный промежуток времени Δt пути ΔS и средние скорости v увеличиваются на *одинаковые величины* (на $2\Delta S_1$ и $2v_1$ соответственно). Такое движение и является *равноускоренным*. Его ускорение постоянно и равно $a = 2v_1/\Delta t$. Оно совершается под действием постоянной силы F .

Таким образом, выполняется закон Ньютона

$$F=Ma.$$

Обратите внимание, что для уменьшения погрешности эксперимента следует по возможности уменьшение относительной роли трения. Для этого необходимо исключить при движении гирь касания стойки; максимально уменьшить трение оси и инерцию *блока* (см. §66). Масса гирь должна быть достаточно большой.

Рис. 70.2.



Вопросы

1. Как изменяется количество движения тела в результате действия на него силы?
2. Что называется импульсом силы?
3. В чём значение второго закона Ньютона?
4. Что определяет быстроту изменения импульса тела?
5. Какие формы написания второго закона Ньютона вы знаете?
6. Как связана сила с массой и ускорением?
7. Как словесно сформулировал второй закон Ньютон?
8. Как связаны между собой первый и второй законы Ньютона?
9. Как экспериментально проверить второй закон? Какие при этом возникают трудности и почему?

§ 31.3. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Третий закон механики Ньютон сформулировал так:

Закон III. Действию F_{12} всегда есть равное и противоположное противодействие F_{21} , иначе – взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные сторон.

В виде формулы это можно записать так:

$$F_{21} = -F_{12}. \quad [8. 2]$$

Взаимодействуют *всегда два* тела. Третий закон определяет **особенности взаимодействия** и, по существу, уже был сформулирован в § 29, где подробно рассматривался этот вопрос.

На рис. 71.2 (ср. с рис 57.2) показано взаимодействие двух тел 1 и 2.

Индексы 1 и 2 в данном случае следует понимать так:

F_{21} (синяя) – сила, с которой тело 2 действует на **тело 1** (красное);

F_{12} (красная) – сила, с которой тело 1 действует на **тело 2** (синее).

Силы F_{21} и F_{12} – одинаковой физической природы, но *приложены к разным телам* (по отношению к каждому из пары тел являются *внешними*). Поэтому эти силы никогда *уравновесить друг друга не могут*. Если силы F_{21} и F_{12} приложены к частям некоторой системы, их называют *внутренними по отношению к этой системе* (но не к её частям!).

Рассмотрим некоторые примеры взаимодействий.

1. Например, когда барон Мюнхаузен потянул себя за волосы, пытаясь вытащить себя из болота (рис. 72.2.), силы F_{21} и F_{12} действовали между его рукой и волосами – *двумя частями* всего его тела. Он почувствовал боль, но вытянуть себя из болота так и не смог.

Сравните этот пример с рис. 61.2. Там в качестве тела (*одного!*), к которому приложены обе силы, рассматриваются *волосы*. Они тоже *уравновешиваются*, растягивая (деформируя) это тело – волосы.

На обоих этих рисунках изображено то, что быть не может.

2. Постараемся объяснить традиционное недоумение: «лошадь тянет телегу, но ведь и телега тянет лошадь с такой же силой в другую сторону». Почему же они движутся, рис. 73.2?

Прежде всего надо помнить, что *лошадь не потянет телегу, если дорога*

III-й закон Ньютона: $F_{21} = -F_{12}$

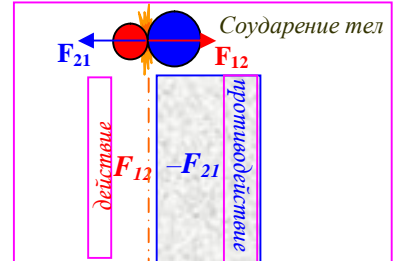
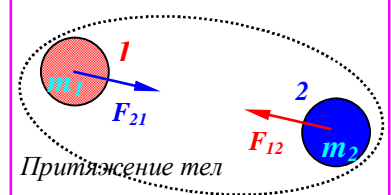


Рис. 71.2. Механическое взаимодействие зеркально симметрично

$$F_{12} = -F_{21}$$

Силы действующая и противодействующая равны по величине, но противоположны

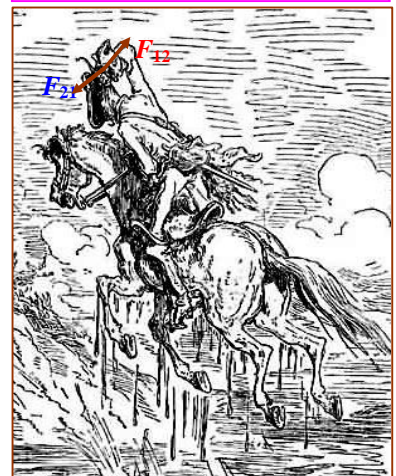


Рис.72.2. Барон Мюнхаузен опять начал рассказывать о том, чего быть не могло! Здесь тело действует «само на себя» – Мюнхаузен «уравновесился». См. рис.63.2.

скользящая. Значит, для объяснения движения надо учесть не одно, а **два** взаимодействия – не только «телега – лошадь», но и «лошадь – дорога». Если телега покоилась, то движение начнётся тогда, когда сила взаимодействия лошади с дорогой (сила, с которой лошадь отталкивается от дороги) станет больше силы взаимодействия «лошадь – телега» (силы, с которой телега тянет лошадь). Что же касается сил «телега тянет лошадь» и «лошадь тянет телегу», то они характеризуют одно и тоже взаимодействие же взаимодействие, а значит, будут одинаковы и в покое и в любой момент движения.

3. При ходьбе мы *носком ноги* отталкиваемся от Земли с силой F_{12} назад, а Земля с силой F_{21} толкает нас вперёд, рис.74.2.

4. На рис. 75.2 показан известный пример равновесия сил приложенных к телеге (одному телу), который описал в своей известной басне И. А. Крылов, рис.55.2. Здесь рак уравнивает действие лебедя и щуки, поэтому телега остаётся в состоянии покоя. Однако, как всегда при рассмотрении взаимодействий, можно выделить **пары** тел. В данном случае это «лебедь – телега»; «рак – телега»; «щука – телега»; «телега – Земля». Силы, приложенные к телеге, уравниваются. Телега покоится, но деформируется.

«В самом деле, - говорит Ньютон в пояснение третьего закона, - если что-либо давит на что-нибудь другое или тянет его, то оно само этим последним давится или тянется. Если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его также нажимается камнем.

Если какое-нибудь тело, ударившись о другое тело, изменяет его количество движения на сколько-нибудь, то и оно претерпит от второго тела в своем собственном количестве движения то же самое изменение, но обратно направленное, ибо давления этих тел друг на друга во время контакта равны».



Вопросы

1. Почему при взаимодействии говорят о двух равных по величине противоположно направленных силах? К чему они приложены?

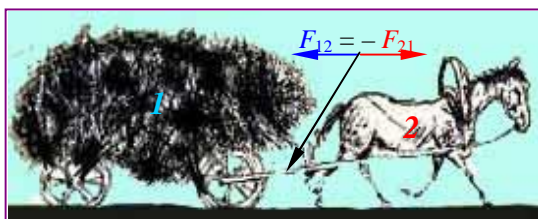


Рис. 73. 2. «Почему телега едет?»
Лошадь 2 копытами отталкивается от Земли 3 и тянет телегу 1, а и телега 1 тянет лошадь 2 с равной по величине силой. Но телега легко катится по Земле 3!
Это пример сложного взаимодействия нескольких тел. Объясните, почему телега едет?

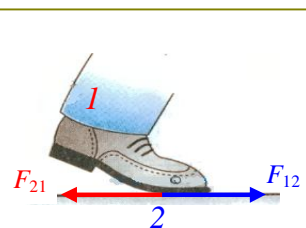
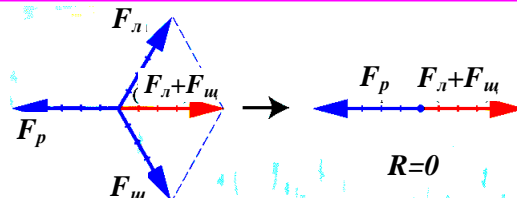
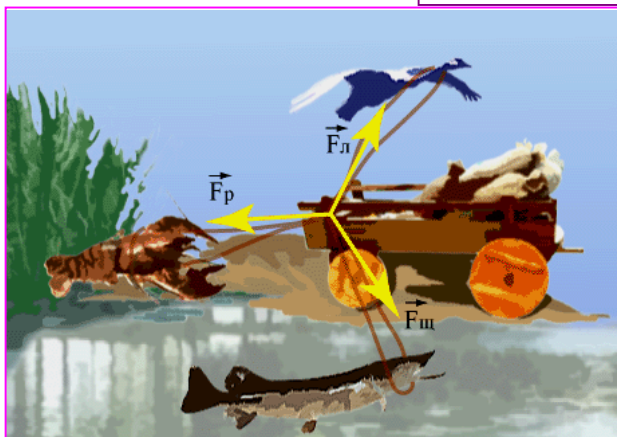


Рис. 74.2. Человек при ходьбе отталкивается от Земли назад с силой F_{21} Земля с такой же силой F_{12} действует на человека вперёд.



Однажды Лебедь, Рак да Щука
Везти с поклажей воз взялись...

Да Лебедь рвётся в облака,
Рак пятится назад, а Щука тянет в воду.

И. А. Крылов

Силы, приложенные к одному телу, уравновешены.
Рис. 75.2. Перечислите все взаимодействующие тела.

2. Как следует себя вести, если вы попали в болото, рис. 72.2? Почему?
3. Объясните рис. 73.2 и рис.74.2.
4. На рис. 75.2 выделены три тела, действующие на телегу. Взаимодействуют ли лебедь, рак и щука ещё с какими-нибудь телами?
5. Объясните явления, изображенные на рис.76.2 и 77.2.

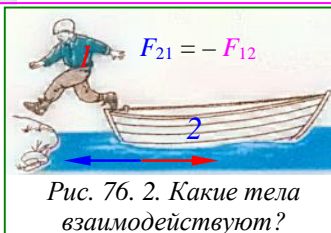


Рис. 76. 2. Какие тела взаимодействуют?

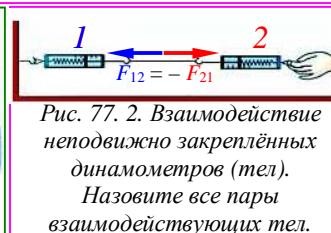


Рис. 77. 2. Взаимодействие неподвижно закреплённых динамометров (тел). Назовите все пары взаимодействующих тел.

$$F = \gamma \frac{M_1 m_2}{r^2}$$

§ 32 (24). ЯВЛЕНИЕ ТЯГОТЕНИЯ (ГРАВИТАЦИИ). ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ.

На чем Земля держится? В далекие времена на этот вопрос давали простой ответ: *на трех китах*. Правда, оставалось неясным, на чем держатся киты. Однако наших наивных прародителей это не смущало.

В самом деле, на чем «держатся» Земля и планеты? Почему они двигаются вокруг Солнца по определенным путям, а не улетают от него прочь? Ответов на эти вопросы не было, пока Исаак Ньютон не открыл в 1682 году **закон всемирного тяготения**.



Рис. 78.2. Еще в 1665 году 23-летний Ньютон высказал предположение, что силы, удерживающие Луну на ее орбите, той же природы, что и силы, заставляющие яблоко падать на Землю.

Известный исторический анекдот говорит, что, сидя в саду под яблоней, задумчиво наблюдая за тем, как от порывов ветра то одно, то другое яблоко падает на землю, Ньютон пришел к мысли о существовании *сил тяготения между всеми телами Вселенной*, рис. 78.2 и 79.2. Их также называют *гравитационными силами*.

Выпустим камень из рук – он упадет на землю (рис. 80.2). То же самое произойдет и с любым другим телом.

ИТАК, ЕЩЁ ОДНО ПОРАЗИТЕЛЬНОЕ ЯВЛЕНИЕ!

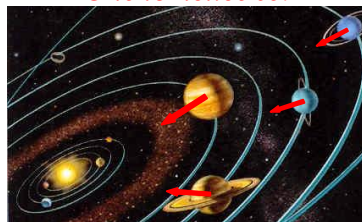
Все тела (все!) связаны невидимыми «нитьями» всемирного тяготения

Очень похоже!

Не верится



Похоже



Сила тяжести $F_{тяж}$ направлена к центру Земли

Рис. 79.2. В результате открытия Ньютона выяснилось, что множество, казалось бы, разнородных явлений – падение свободных тел на землю, видимые движения Луны и Солнца, океанские приливы и т. д. – представляют собой проявления одного и того же закона природы: **закона всемирного тяготения**.

Между всеми телами Вселенной действуют силы взаимного притяжения.

На первый взгляд закон кажется неверным: мы не замечаем притяжения друг к другу окружающих нас предметов. Земля притягивает к себе любые тела, в этом никто не усомнится. Но, может быть, это особое свойство Земли? Нет, это не так. Притяжение двух любых предметов невелико и поэтому не бросается в глаза. Тем не менее, специальными опытами его можно обнаружить.

Наличие всемирного тяготения, и только оно, объясняет устойчивость солнечной системы, движение планет и других небесных тел.

Если мяч бросить в горизонтальном направлении, то он не летит прямолинейно и равномерно. Его траекторией будет кривая линия (рис.81.2). Искусственный спутник, запущенный с Земли, так же летит не по прямой, а движется вокруг Земли, как бы «привязанный» к ней (рис. 82.2; 83.2).

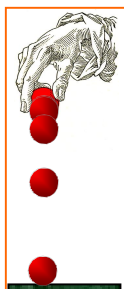


Рис. 80. 2. Все тела падают на Землю.

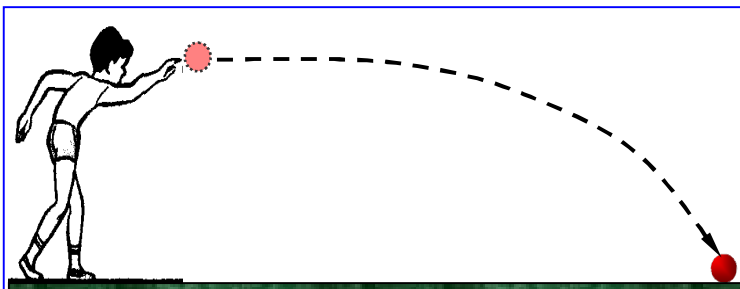


Рис. 81. 2. Если мяч бросить в горизонтальном направлении, то он не летит прямолинейно и равномерно, а тоже падает на Землю. Его траекторией будет кривая линия. Такая кривая называется *параболой*.

В чем же причина наблюдаемых явлений? На эти тела действует сила – это сила притяжения к Земле. Вследствие притяжения к Земле падают тела, поднятые над Землей, а потом опущенные. Листья деревьев опускаются на Землю, потому что Земля притягивает их. Благодаря притяжению к Земле течет вода в реках. Более того, по этой же причине Луна вращается вокруг Земли. А

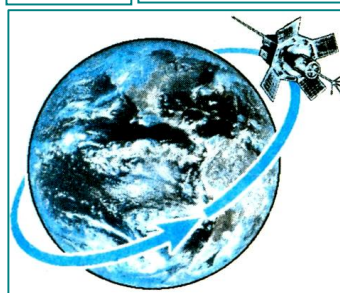


Рис. 82. 2. Спутник тоже падает, но мимо Земли: у него слишком большая горизонтальная скорость

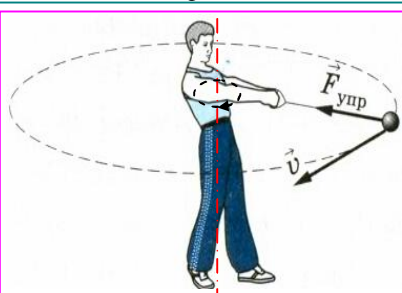


Рис. 83. 2. Круговое движение небесных тел происходит так же, как круговое движение камня, закрученного на веревке

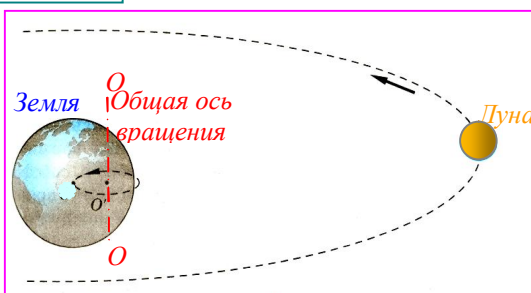


Рис. 84.2. Луна и Земля совершают орбитальное вращение вокруг оси, проходящий через общий центр масс, лежащий ниже поверхности Земли.

Земля – вокруг Солнца...

Земля не только притягивает к себе Луну, но и сама притягивается ею (в соответствии с третьим законом Ньютона). В результате не только Луна движется по траектории вокруг Земли, но и Земля приобретает орбитальное движение, рис. 84.2. Земля удерживается на своей траектории силами притяжения Солнца. Круговое движение небесных тел происходит так же, как круговое движение камня, закрученного на веревке, рис. 83.2.

Притяжение всех тел Вселенной друг к другу называется всемирным тяготением (гравитацией).

Согласно закону всемирного тяготения, тела притягиваются друг к другу с силой F , прямо пропорциональной их массам m_1 и m_2 и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}. \quad [9.2]$$

Замечания:

1. Эта формула справедлива для материальных точек (когда размеры тел m_1 и m_2 малы по сравнению с расстоянием r между ними) и тел сферической формы;
2. В формулу входит коэффициент – гравитационная постоянная $\gamma = 6,67 \times 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$.

Очень маленькая величина этого коэффициента означает, что и сила F чрезвычайно мала в случаях привычных для нас масс тел m_1 и m_2 и расстояний r между ними.

Например, подсчитаем, с какой силой F притягиваются два человека, если масса каждого из них $m_1 = m_2 = 50$ кг, а расстояние между ними $r = 1$ м:

$$F = F_{21} = -F_{12} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{H \cdot m^2}{кг^2} \cdot \frac{50кг \cdot 50кг}{1м^2} \cong 1,67 \cdot 10^{-7} Н.$$

Эта *очень маленькая сила*, которую заметить невозможно. Отсюда ясно, почему в наших повседневных наблюдениях мы не замечаем взаимного притяжения.

Совсем другое дело, если хотя бы одно из взаимодействующих тел имеет планетарную **массу**. Например, если это **Земля**, то расчёты силы F дадут нам привычные значения сил тяжести $F_{тяж}$ различных тел (см. пример в начале § 33).

Тяготение играет решающую роль в космических процессах образования планетарных систем, галактик, движения спутников вокруг планет, сжатия звёзд в ходе эволюции Вселенной, образование «чёрных дыр»; приливов и отливов (см. Приложение №2). Приливы и отливы происходят не только водных масс океанов, но и в толще Земли. Не замечая этого, мы дважды в сутки поднимаемся и опускаемся более чем на 0,7 м. Приливные явления вызывают непрерывные деформации не только водных масс океанов, но и самого земного шара. Это постепенно замедляет суточное вращение Земли.

В микромире гравитационные силы ничтожны и никакой роли не играют.

§ 33 (24). СИЛА ТЯЖЕСТИ $F_{тяж}$.

Сила, с которой тела притягиваются к Земле (или другой планете), называется силой тяжести $F_{тяж}$. Она направлена вертикально вниз, к центру Земли (планеты).

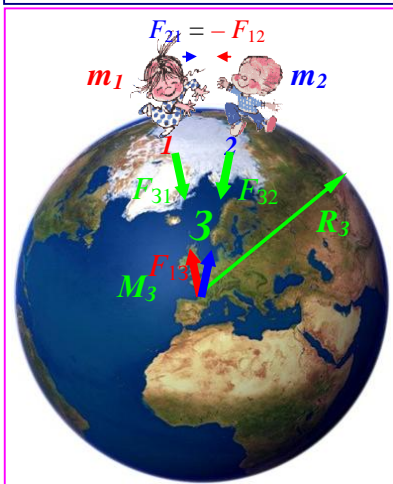


Рис. 85. 2. Взаимодействие тел 1 и 2 друг с другом:

$$F = F_{21} = -F_{12} = 1,67 \cdot 10^{-7} Н.$$

Взаимодействие с Землёй 3:

$$\text{тело 1: } F_{тяж} = F_{31} = -F_{13} \cong 488 Н.$$

$$\text{тело 2: } F_{тяж} = F_{32} = -F_{23} \cong 488 Н.$$

Подсчитаем, с какой силой тело массой $m_1 = 50$ кг, находящееся на поверхности Земли – на расстоянии $r = R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м от её центра, притягивается к ней. Иными словами, определим **силу тяжести $F_{тяж}$** этого тела. Масса Земли $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг.

Для этого воспользуемся формулой Ньютона [9.2]:

$$F_{тяж} = F_{31} = -F_{13} = \gamma \frac{M_3}{R_3^2} m_1 =$$

$$= 6,67 \times 10^{-11} \frac{H \cdot m^2}{кг^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} кг}{(6,4 \cdot 10^6)^2 м^2} \cdot 50 кг \cong 488 Н. \quad [9.2, a]$$

Приблизительно с такой силой F_{31} Земля притягивает и вас. **Это ваша сила тяжести $F_{тяж}$** . Точно с такой же по величине силой F_{13} вы притягиваете Землю.

§ 34. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ g

В формуле [9.2,а], выражающей силу гравитационного притяжения тел, выделим множитель, который зависит *только* от массы M_3 , радиуса R_3 Земли (или той планеты, притяжение на *поверхности* которой мы хотим вычислить) и универсальной *гравитационной постоянной* γ . Вычислим величину этого множителя для **Земли**:

$$g = \gamma \frac{M_3}{R_3^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{H \cdot m^2}{кг^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} кг}{(6,4 \cdot 10^6)^2 м^2} \cong 9,8 \text{ Н/кг}. \quad [10.2]$$

Эта величина имеет размерность ускорения (Н/кг=м/с²) и называется **ускорением свободного падения у поверхности Земли**. С таким ускорением на землю падают все тела, если на них действует только сила тяжести $F_{тяж}$.

Эту величину и определял Галилей, бросая шары с башни в городе Пизе, см. рис. 9 (§3) «Введения». Подчеркнём, что она зависит *только от параметров Земли*: $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг; $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м.

В соответствии с законом всемирного тяготения [9.2,а], **силу тяжести $F_{тяж}$ любого тела с массой m , которое находится на поверхности Земли**, можно определить, умножая вычисленную нами величину g на массу m тела, по очень простой формуле:

$$F_{тяж} (Н) = g m = 9,8 (м/с^2) m (кг) \quad [11.2]$$

Таким образом, **сила тяжести $F_{тяж}$ прямо пропорциональна ускорению свободного падения g и массе тела m .**

Если сравнивать два тела с разной массой, то про тело с большей массой говорят: оно *тяжелее*. Тело с меньшей массой будет *легче*.

Во сколько раз масса одного тела больше массы другого тела, во столько же раз и сила тяжести, действующая на первое тело, больше силы тяжести, действующей на второе. Когда массы тел одинаковы, то одинаковы и действующие на них силы тяжести.

Земной шар немного сплюснут у полюсов. Поэтому тела, находящиеся около полюсов, расположены немного ближе к центру Земли, так что величина R_3 оказывается несколько меньше. В связи с этим ускорение свободного падения g и сила тяжести $F_{тяж}$ на полюсах немного больше, чем на экваторе или на других широтах.

Наоборот, величина g и сила тяжести $F_{тяж}$ на вершине горы (на высоте h) немного меньше, чем у ее подножия. Это различие незаметно, если тело находится над поверхностью Земли на высоте h много меньшей её радиуса R_3 ($h \ll R_3$).

В соответствии с формулой [10.2], ускорение свободного падения g у поверхности различных небесных тел будет разным (в зависимости от их массы M и радиуса R). Поэтому тела одной и той же массы m на разных планетах будут иметь разную силу тяжести $F_{тяж}$. В *таблице* ниже приведены значения g ($м/с^2$) и отношения g/g_3 (здесь $g_3 = 9,798 м/с^2$) на поверхности различных небесных тел.

Небесное тело	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Луна	Солнце
g ($м/с^2$) на поверхности	3.70	8.87	9.798	3.71	24.79	10.44	8.87	11.15	1,62	274,3
$F_{тяж}/F_{тяжЗ} = g/g_3$	0.378	0.907	1.000	0.377	2.364	0.916	0.889	1.12	0,165	28

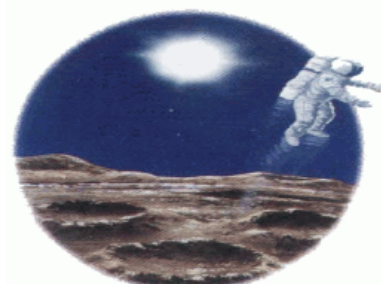
Вопросы



1. Почему тела, брошенные горизонтально, падают на землю?
2. Какую силу называют силой тяжести? Как ее обозначают?
3. Почему сила тяжести на полюсах Земли несколько больше, чем на экваторе и других широтах?
4. Как зависит сила тяжести от массы тела?
5. Как направлена сила тяжести?
6. Как изменяется сила тяжести при подъёме над поверхностью Земли?
7. От чего зависит ускорение свободного падения и сила тяжести на поверхности различных небесных тел?



Незнайка при подлёте к Луне: «Появилась сила тяжести!»



Незнайка на Луне: «Но эта сила здесь в 6 раз меньше, чем на Земле!»

§ 35. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ СИЛ

Гравитационные силы являются проявлением одного из четырёх фундаментальных взаимодействий (см. § 28). Люди привыкли, что взаимодействия тел осуществляются через их *соприкосновение* – «близкодействие». Но в соответствии с формулой Ньютона [9.2], гравитационное взаимодействие тел происходит *мгновенно* через «пустое» пространство, причём расстояния между телами могут быть *огромными* – «дальнодействие», рис. 86.2. Это казалось неправдоподобным и вызвало поток критики (см. Приложение 1 гл.2).

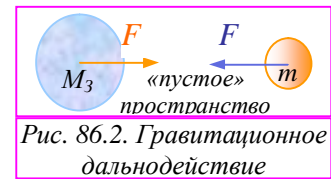


Рис. 86.2. Гравитационное дальнодействие

В настоящее время признано фактом, что подобные взаимодействия осуществляются через посредство **силового поля** (поля тяготения). Это поле, наряду с веществом, является одной из *форм материи*.

Вокруг любого массивного тела (например, Земли массой M_3) имеется **гравитационное поле**, проявляющееся в том, что на помещенную в него материальную точку действует гравитационная сила, пропорциональная массе m этой точки. Тело, создающее гравитационное поле (например, Земля массой M_3), называется **источником** поля. Мы постоянно ощущаем на себе эту силу в виде силы тяжести F (рис. 87.2).

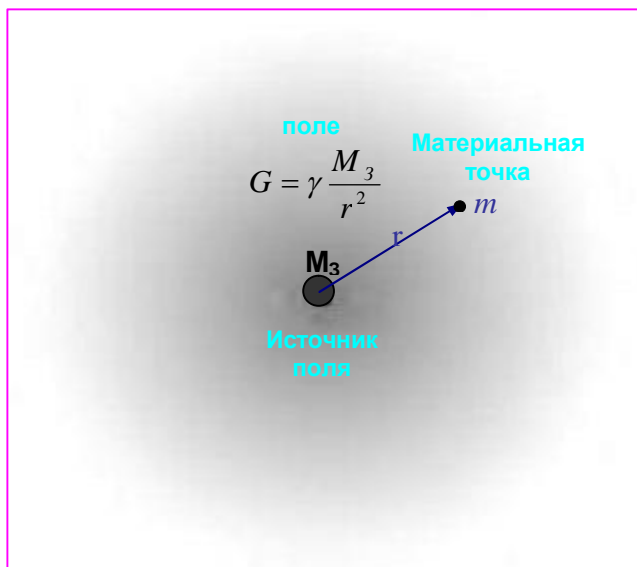


Рис.87.2а. Гравитационное поле тела массой M_3 (источника поля) условно можно представить в виде ореола напряженности G вокруг него, убывающей при удалении от центра источника по закону $G \sim 1/r^2$. Сила тяжести $F = mG$, направлена к центру Земли.



Рис.87.2б. Гравитационное поле тела массой M_3 (источника поля – Земля) можно представить в виде силовых линий поля (вдоль которых действуют силы притяжения), ортогональных поверхностям постоянного уровня напряженности G .

Для выяснения смысла понятия «поля» поступим следующим образом. Введём величину G , называемую напряженностью поля или, для краткости – просто *поле*. А формулу Ньютона

$$F = \gamma \frac{M_3 m}{r^2}. \quad [9.2]$$

заменяем двумя:

$$G = \gamma \frac{M_3}{r^2} \quad [12.2] \quad \text{и} \quad F = mG, \quad [13.2]$$

Суть такого преобразования в том, что анализ разделяется на две части. Одна часть [12.2] говорит, что *что-то создаёт* поле, а другая [13.2] – что *поле действует* на *что-то*. Позволяя нам рассматривать две части независимо, это разделение упрощает во многих случаях решение задач и означает, что поле существует вокруг своего источника – Земли *независимо* от того, существуют ли вокруг неё другие тела! Силовое поле – есть *объективная реальность*.

Вспомните, когда мы говорили о силах, мы подчёркивали, что одна сила не может существовать сама по себе. Силы всегда встречались попарно, имели зеркальную симметрию. А здесь всё совсем иначе: источник поля – гравитационная масса *изменяет свойства пространства* вокруг себя! С аналогичными явлениями мы встретимся, когда будем рассматривать электромагнитное поле. Это свойственно только *фундаментальным силовым полям*.

Итак, вокруг Земли имеется гравитационное силовое поле, притягивающее все тела к центру Земли. Сила тяжести направлена по радиусу. Такое поле называют **центральный**.

Иное дело – вблизи поверхности Земли, на небольших высотах h , когда $h \ll R_3$. Здесь Земля представляется **плоской**. Именно так представляли её наши предки, *рис. 11* во **Введении**.

Вблизи поверхности Земли ($r \approx R_3$) напряженность гравитационного поля и ускорение свободного падения равны привычному значению: $G = g = 9,8 \text{ м/с}^2 \approx \text{const}$, а сама поверхность Земли, вернее её видимая часть, выглядит плоской. В этом случае гравитационное поле можно изобразить так, как это сделано на *рис. 88.2*. Такое поле называется **однородным**.

Сравним центральное и однородное поля.

Красные линии – это силовые линии поля. По ним направлено ускорение силы тяжести G (напряженность поля) и сила тяжести F , действующие на любую материальную точку m в гравитационном поле.

Для **центрального** поля (*рис. 87.2*) это **радиальные линии, направленные к центру** Земли.

Для **однородного** поля (*рис. 88.2*) – это **вертикальные линии, направленные вниз**.

Зелёные линии обозначают сечения поверхностей постоянных значений напряженности поля G . На этих поверхностях $G = \text{const}$.

В случае **центрального** поля (*рис. 87.2*) – это **сферы**.

В случае **однородного** поля (*рис. 88.2*) – это **горизонтальные плоскости, отстоящие очень далеко друг от друга, т. к. вблизи поверхности Земли $G = g \approx \text{const}$** .

Замечание: F, G, g – векторы, направленные к источнику поля. Но здесь используются лишь их модули.

Всё связанное с взаимодействиями на расстояниях казалось странным вплоть до XX века.

Если из уравнения [9.2] следовало, что «одна масса притягивает другую» и взаимодействие это происходит *мгновенно* через «пустоту» (так называемое «дальнодействие»), то формулы [12.2] и [13.2] предполагают *наличие в пространстве некоторой материальной среды – гравитационного поля*. Последнее соответствует современным представлениям о механизме передачи взаимодействий непосредственно от точки к точке («близкодействие»).

Передача в действительности каких-либо взаимодействий *мгновенно* невозможна.

Расстояние от Земли до Луны **свет** проходит за $\approx 1,2$ с. Скорость света – это *самая большая скорость* передачи взаимодействий.

Таким образом, переход от уравнения [9.2] к равенствам [12.2] и [13.2] есть нечто большее, чем просто математическое преобразование.

О движении материальной точки в гравитационном поле Земли см.

Приложение №3 к гл.2.



Гравитационное поле – реальность!

Вопросы

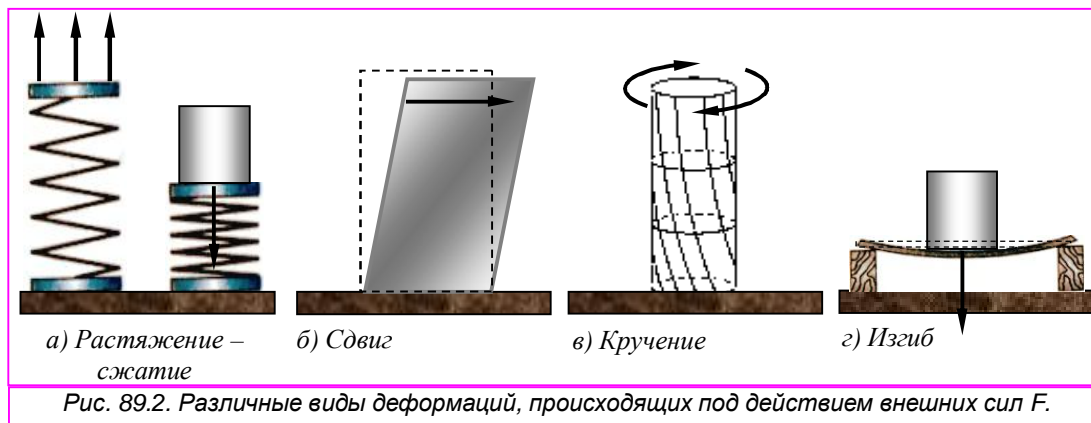


1. Что вызвало наиболее острую критику основного труда Ньютона?
2. Что такое «дальнодействие» и «близкодействие»?
3. Какими математическими преобразованиями вводится понятие «гравитационное поле»? Что принципиально новое вносит это понятие в физику?

§ 36 (25). ДЕФОРМАЦИЯ. СИЛЫ УПРУГОСТИ $F_{упр}$. ЗАКОН ГУКА

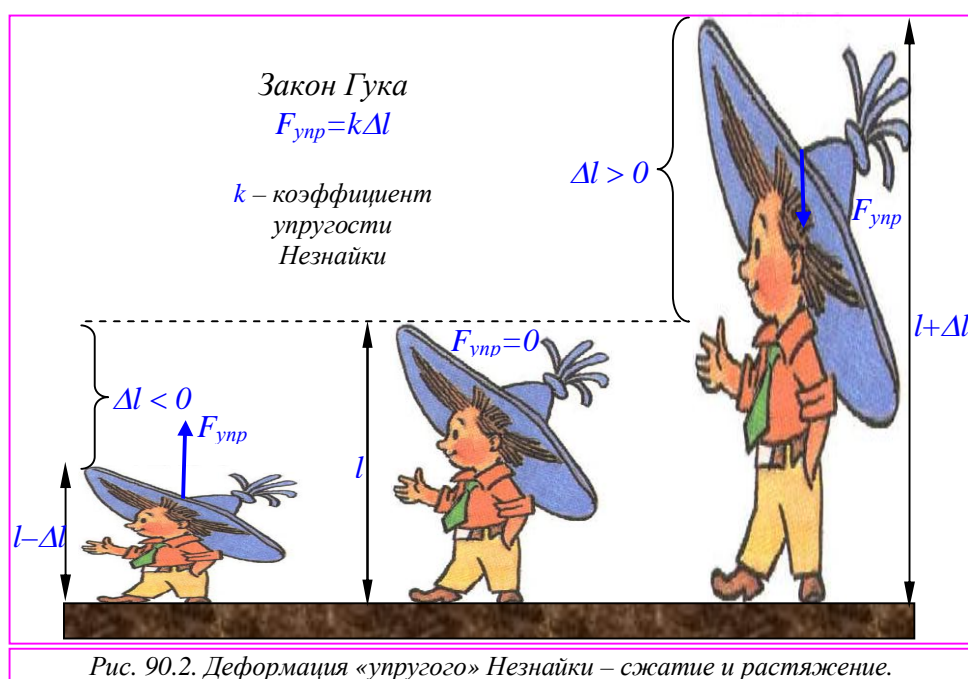
Напомним, что *деформация* – изменение формы или/и размеров тела может происходить в результате действия на тело силы. Если эта сила не слишком велика, деформация исчезает после прекращения действия силы. Такие деформации и силы, а также тела, их испытывающие, называются *упругими*.

Существуют различные виды упругих деформаций, рис. 89.2.



§ 36.1. ПРИРОДА И НАПРАВЛЕНИЕ СИЛ УПРУГОСТИ $F_{упр}$.

В главе 1 (см. §10) говорилось, что частицы вещества, из которых состоят тела, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одну из них плотнее прижать к другой, (если в своём хаотическом движении они приближаются друг к другу на слишком малые расстояния) – третье положение МКТ. Если на тело не действуют внешние силы, частицы его вещества находятся в равновесных положениях, рис. 20.1. Таково положение частиц (молекул, атомов, ионов) при отсутствии деформации тела.



Но при деформации изменяются расстояния между микрочастицами тела и возникают силы притяжения (при растяжении тела $\Delta l > 0$) или отталкивания (при сжатии тела $\Delta l < 0$). Они стремятся вернуть частицы в исходное, устойчивое положение. Их называют *упругими силами* $F_{упр}$. Упругие силы всегда направлены против смещения частиц тела.

Если деформации нет, то $F_{упр} = 0$, рис. 90.2.

Силы упругости $F_{упр}$ возникают в результате взаимодействия частиц вещества и имеют *электромагнитную природу*.

§ 36.2. ВЕЛИЧИНА СИЛЫ УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА

Опыт показывает, что *величина* упругой силы $F_{\text{упр}}$ прямо пропорциональна величине деформации (например, удлинению Δl) тела:

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l. \quad [14.2]$$

Здесь: k – *коэффициент упругости* (жесткость) тела зависит от материала и размеров тела.

Зависимость [14.2] называется *законом Гука* для деформаций растяжения – сжатия.

Чем большая сила F приложена к упругому телу, тем больше его деформация Δl и тем большая сила $F_{\text{упр}}$ упругости препятствует деформации. В данном случае сила F – *действие*, а сила $F_{\text{упр}}$ – *противодействие*. По третьему закону Ньютона:

$$F = -F_{\text{упр}}.$$

Из формулы [14.2] легко определить единицу жесткости тела. В СИ она равна:

$$k = F_{\text{упр}}/\Delta l \Rightarrow [k] = [F_{\text{упр}}]/[\Delta l] = 1 \text{ Н}/1 \text{ м} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Ну а что будет, если приложенные к телу силы увеличить? В этом случае пропорциональность между приложенной силой F и Δl , свойственная *упругой* деформации, нарушается. Соответствующая граница называется *пределом упругости*. Удлинение Δl начинает возрастать *без увеличения силы F* . В этом случае говорят: тело «течет». Затем тело разрушается.



Вопросы

1. Когда возникает сила упругости?
2. Что называют деформацией тела? Какие виды деформаций вы знаете?
3. Как формулируется закон Гука? Как записывается закон Гука?
4. Что такое жесткость тела?
5. Что произойдет, если увеличивать силу, вызывающую деформацию тела?

§ 36.3. ПРИМЕРЫ УПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Рис. 91.2. На штативе закреплён резиновый шнур. Его первоначальная длина l_0 . Если к свободному концу шнура подвесить чашку с гирей, то шнур удлинится. Его величина станет равной l . Удлинение шнура Δl можно записать так:

$$\Delta l = l - l_0.$$

Если менять гири на чашке, будет меняться и длина шнура, а значит, его деформация – удлинение Δl .

Этот опыт также показывает, что модуль силы упругости при растяжении (или сжатии) тела (шнура) прямо пропорционален изменению длины тела:

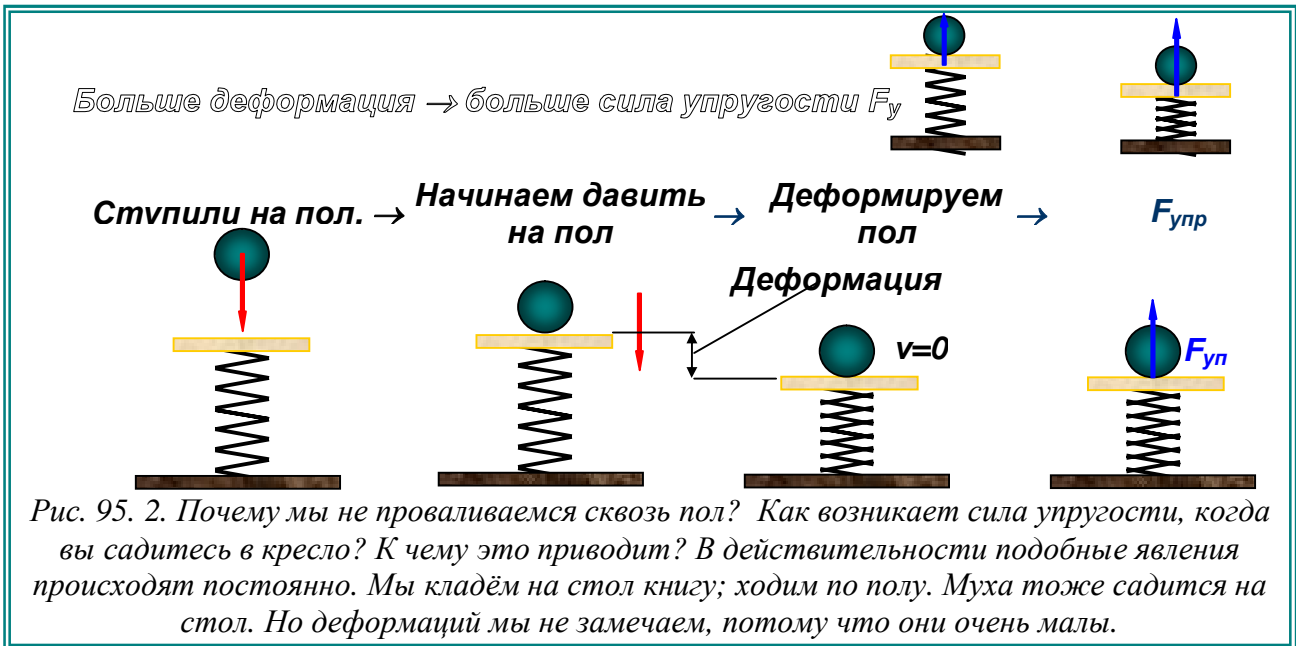
$$F_{\text{упр}} = k\Delta l.$$

Рис.92.2. трое растягивают экспандер. Кто сильнее?

Рис.93.2. Что происходит с верёвкой? Что и как здесь деформируется?

Рис. 94.2. Что и как здесь оказалось деформированным?

На рис. 55.2 стоит автомобиль (первое фото). Его шины заметно сжаты, но деформация корпуса не видна. Что можно сказать о жесткости k шин и корпуса автомобиля? О жесткости корпуса яхты и её парусов? ветвей и стволов деревьев (второе и третье фото)?



§ 37(26). ВЕС ТЕЛА \vec{P}

Вес тела P – сила, с которой тело действует на опору или подвес.

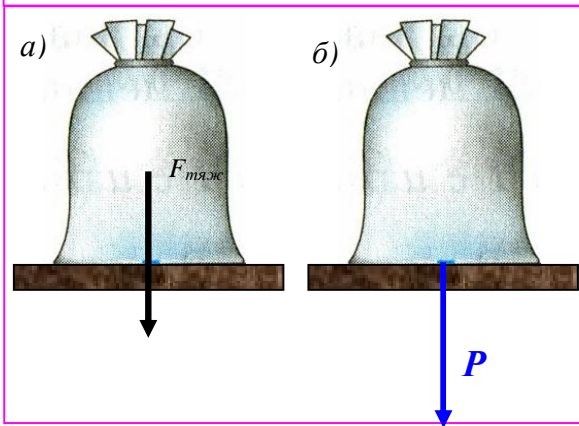


Рис. 96.2. а). На мешок вследствие притяжения Земли действует сила тяжести $F_{тяж}$, деформируя мешок. б). Мешок действует вследствие притяжения Земли на опору своим весом P , деформируя опору.

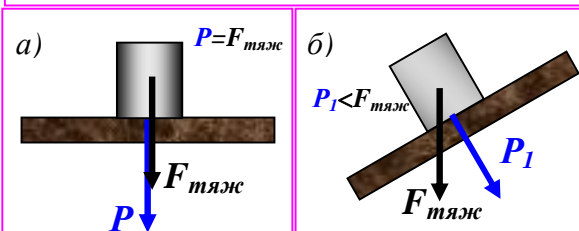


Рис. 97.2. а) На горизонтальной опоре вес P и сила тяжести $F_{тяж}$ равны по величине и сонаправлены. б) На наклонной опоре вес P_1 меньше силы тяжести $F_{тяж}$ и по направлению с ней не совпадает.

В повседневной жизни очень часто используется понятие «вес». Это тоже сила упругости.

Вес тела возникает в результате взаимодействия **тела и опоры** (подвеса), рис. 96-98.2. Опора (подвес) и тело при этом деформируются, что приводит к появлению силы упругости (см. §36).

Для измерения веса тела используются **весы**. Вес тела P часто путают, во-первых, с силой тяжести $F_{тяж}$; во-вторых, с массой m тела.

1). P и $F_{тяж}$.

Следует помнить, что **сила тяжести $F_{тяж}$ приложена к телу, а вес P приложен к опоре** (или подвесу), рис. 96.2; 98.2.

Если тело и горизонтальная опора неподвижны или движутся равномерно и прямолинейно, то вес P тела по своему числовому значению равен силе тяжести $F_{тяж}$ (см. рис. 97.2. а) т. е.

$$P = F_{тяж} = mg.$$

Если опора наклонная, вес тела P_1 (сила, действующая на наклонную опору) меньше силы тяжести тела $F_{тяж}$, рис.

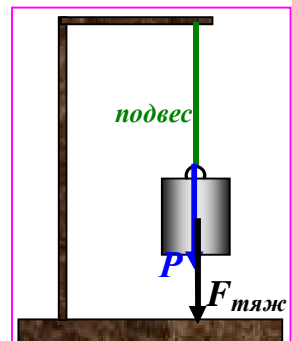


Рис. 98.2. Вес P (действует на подвес) и сила тяжести $F_{тяж}$ (действует на тело).

97.2.

Вес P и силу тяжести $F_{тяж}$ часто путают. Обе эти силы связаны с притяжением тел к Земле. Но следует помнить, что *сила тяжести $F_{тяж}$ возникает вследствие взаимодействия тела и Земли.*

Отличительные признаки силы тяжести $F_{тяж}$ и силы веса P сведены в таблицу:

Сила тяжести $F_{тяж}$	Вес P
Приложена к телу	Приложен к опоре (подвесу)
Относится к силам тяготения	Разновидность сил упругости
Направлена к центру Земли	Перпендикулярен опоре

2). P и m .

В этом случае путаница обусловлена тем, что в быту понятие «вес» более привычно, чем понятие «масса», а также тем, что при взвешивании на обычных весах вес просто пропорционален массе $P=gm$, причём ускорение силы тяжести g можно считать величиной постоянной. Хотя это величины с физической точки зрения совершенно разные. Эти различия также сведены в таблицу:

Масса m	Вес P
Определяет силу тяжести тела	Приложен к опоре (подвесу)
Скалярная величина, не имеет направления	Вектор, имеет направление в пространстве
Измеряется в килограммах	Измеряется в ньютонах

Вопросы



<p>P m</p>		
<p>Мяч в гравитационном поле Земли весит 5 Н. Сколько весит Земля в гравитационном поле мяча? Какова масса мяча?</p>	<p>Лыжник спускается с горы с уклоном 45°. Масса лыжника 50 кг. Каков его вес? Какова сила тяжести, действующая на лыжника?</p>	<p>Масса первого советского спутника 85 кг. Высота его полёта мала по сравнению с радиусом Земли. Каков вес летящего спутника? Какова его сила тяжести?</p>

Нет опоры (подвеса) – нет веса!

1. Что называют весом тела?
2. Чем отличается вес тела от силы тяжести?
3. Когда они совпадают по величине и направлению?
4. Почему путают массу и вес тела? В чем их различие?
5. На чём измеряют вес тела?

§ 38 (28) ДИНАМОМЕТРЫ

На практике часто приходится измерять силу, с которой одно тело действует на другое. Для измерения силы используется прибор, который называется *динамометр* (от греческих слов *динамис* – сила, *метрео* – измеряю).

Динамометры бывают различного устройства. Основная их часть – *стальная пружина*, которой придают разную форму в зависимости от назначения прибора. *Устройство*

простейшего динамометра основывается на сравнении любой силы с силой упругости пружины.

Простейший динамометр можно изготовить из пружины с двумя крючками, укрепленной на дощечке (рис. 99.2). К нижнему концу пружины прикрепляют указатель, а на доску наклеивают полоску белой бумаги.

Отметим на бумаге черточкой положение указателя при нерастянутой пружине. Эта отметка будет нулевым делением (см. рис. 99.2, а).

Затем к крючку будем подвешивать груз массой $\frac{1}{9,8}$ кг, т. е. 102 г. На

этот груз будет действовать сила тяжести, равная 1 Н. (объясните – почему!). Под действием этой силы (1 Н) пружина растянется, указатель опустится вниз. Его новое положение отмечаем на бумаге и ставим цифру 1 (рис. 99.2, б). После чего подвешиваем груз массой 204 г и ставим цифру 2. Это означает, что в таком положении сила упругости пружины равна 2 Н. Подвесив груз массой 306 г, наносим метку 3 и т. д.

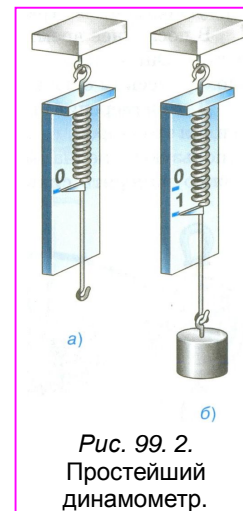


Рис. 99.2. Простейший динамометр.

Для того чтобы измерить десятые доли ньютона, нужно нанести деления – 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и т. д. Для этого расстояния между отметками 0 и 1; 1 и 2; 2 и 3; 3 и 4 и далее делят на десять равных частей. Так можно сделать, учитывая, что сила упругости пружины $F_{упр}$ увеличивается во столько раз, во сколько увеличивается ее удлинение Δl . Это следует из закона Гука: $F_{упр} = k\Delta l$, т. е. сила упругости тела при растяжении прямо пропорциональна изменению длины тела.

Проградуированная таким образом пружина и будет простейшим динамометром.

С помощью динамометра измеряют не только силу тяжести, но и другие силы (сила упругости, сила трения и т. д.).

Так, например, для измерения силы различных мышечных групп человека используют **медицинские динамометры**.

Для измерения мускульной силы руки при сжатии кисти в кулак применяют **ручной динамометр - силомер** (рис. 100.2).

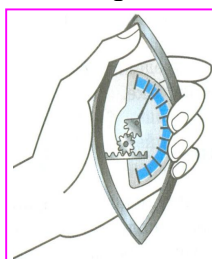


Рис. 100.2. Динамометр – силомер

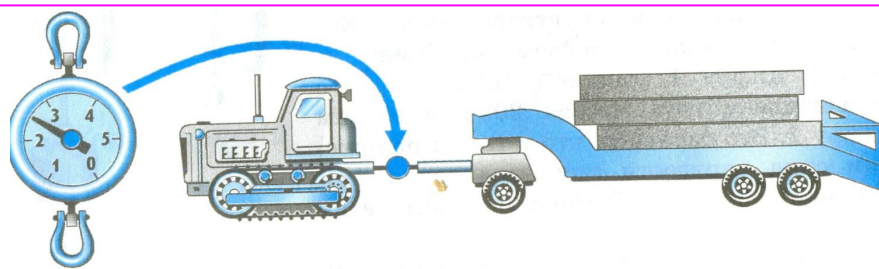


Рис. 101.2. Для измерения больших сил, таких, например, как тяговые усилия тракторов, тягачей, локомотивов, морских и речных буксиров, используют специальные **тяговые динамометры**. Ими можно измерить силы до нескольких десятков тысяч ньютонов.

Применяют также ртутные, гидравлические, электрические и другие динамометры.

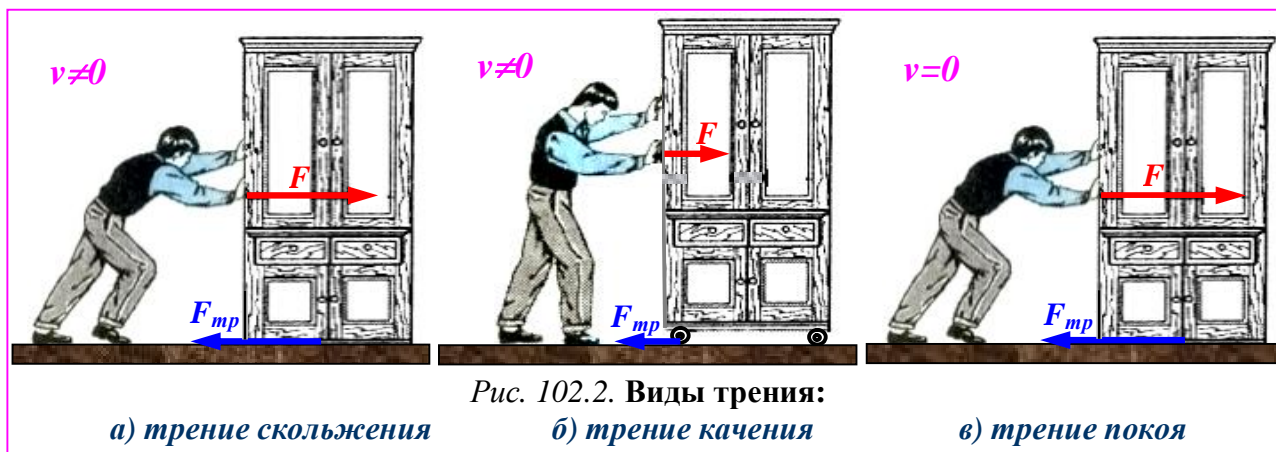
В последнее время широко применяются электрические динамометры. Они состоят из датчика, который преобразует деформацию в электрический сигнал.



Вопросы

1. Как называют прибор для измерения силы?
2. Как изготовить простейший динамометр?
3. Как нанести на шкалу динамометра деления, соответствующие 0,1 Н?
4. Какие типы динамометров вам известны?

§ 39 (30). СИЛЫ ТРЕНИЯ $\vec{F}_{тр}$



§ 39.1. ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ И КАЧЕНИЯ

Мальчик, разбежавшись, скользит на коньках по льду, но, как бы ни был гладок лед, мальчик все-таки останавливается. Останавливается и велосипед, когда велосипедист прекращает вращать педали. Мы знаем, что причиной всякого изменения, в данном случае уменьшения, скорости движения является сила. Значит, и в рассмотренных примерах на каждое движущееся тело действовала сила.



При соприкосновении одного тела с другим возникает взаимодействие, препятствующее их относительному движению, которое называют **трением**. А силу, характеризующую это взаимодействие, называют **силой трения**.

Она обозначается буквой F с индексом: $F_{тр}$. **Сила трения** – это еще один вид силы, отличающийся от рассмотренных ранее сил **тяжести** и **упругости**.

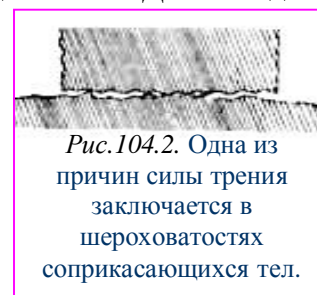
Одна из причин возникновения силы трения является шероховатость поверхностей соприкасающихся тел. Даже гладкие на вид поверхности тел имеют неровности, бугорки и царапины. На

рис.104.2 неровности изображены в увеличенном виде. Когда одно тело **скользит** или **катится** по поверхности другого, эти **неровности цепляются друг за друга**, что создает некоторую силу, задерживающую движение.

Другая причина – **взаимное притяжение молекул соприкасающихся тел**, рис. 105.2.

Когда поверхности тел шероховаты, грубо обработаны, то возникновение сил трения обусловлено главным образом шероховатостью. Если же поверхности тел отполированы, то при соприкосновении часть их молекул располагается настолько близко друг к другу, что заметно проявляется притяжение между молекулами соприкасающихся тел (см. §10).

Силу трения можно уменьшить в несколько раз, если ввести между трущимися поверхностями смазку. Слой смазки разделяет поверхности трущихся тел, мешая им соприкасаться. Теперь скользят друг по другу не поверхности тел, а слои смазки. Смазка же в большинстве случаев жидкая, а трение слоёв жидкости меньше, чем твёрдых поверхностей.



Например, малое трение при скольжении по льду на коньках объясняется тем, что между коньками и льдом образуется тонкий слой воды. В технике в качестве смазки широко применяют различные масла. Ни один автомобиль без смазки не поедет.

1. **Трение скольжения.** При *скольжении* одного тела по поверхности другого возникает трение, которое называют **трением скольжения**, *рис.102.2,а*. Такое трение возникает, например, при движении саней *рис.103.2* и лыж по снегу.

Силу трения можно измерить с помощью динамометра или гирь, *рис.106.2*. Чтобы измерить, например, силу трения скольжения книги по столу, надо прикрепить её к перекинутому через блок шнурку с чашкой для гирь и подобрать массу гири так, чтоб книга равномерно двигалась по столу. На книгу действуют две силы – сила упругости шнурка $F_{упр}$, равная весу чашки с гирей, направленная в сторону движения, и сила трения $F_{тр}$, направленная против движения. Так как книга движется равномерно, это значит, что равнодействующая этих двух сил равна нулю, т. е. эти силы равны по модулю, но противоположны по направлению.

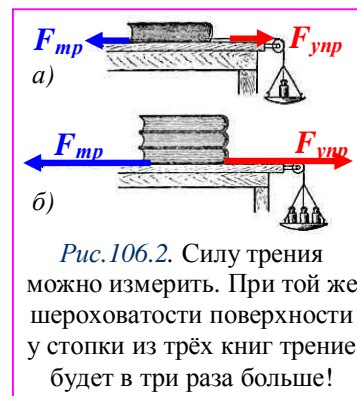


Рис.106.2. Силу трения можно измерить. При той же шероховатости поверхности у стопки из трёх книг трение будет в три раза больше!

Таким образом, измеряя силу $F_{упр}$, которая действует на тело при его равномерном движении, мы находим силу трения $F_{тр}$, *рис.106.2,а*.

Если тянуть стопку из нескольких книг или нажать на книгу рукой и измерить по описанному выше способу силу трения, то она окажется больше, *рис.106.2,б*. Чем больше сила, прижимающая тело к поверхности $F_{д}$, тем больше сила трения $F_{тр}$, возникающая при этом.

Сила трения скольжения пропорциональна силе давления одной поверхности на другую:

$$F_{тр} = \mu F_{д} \quad [15.2]$$

Материалы поверхностей	Коэффициент μ
Металл по металлу	0,15 – 0,20
Дерево по дереву	0,20 – 0,50
Металл по металлу при смазке	0,06 – 0,028
Шина по сухому асфальту	0,50 – 0,70
Шина по мокрому асфальту	0,35 – 0,45
Шина по сухой грунтовой дороге	0,40 – 0,50

Коэффициент пропорциональности μ называется **коэффициентом трения скольжения**. Он зависит от материала, качества обработки, смазки трущихся поверхностей, а также скорости их относительного движения. Коэффициент μ определяется опытным путём, *см. таблицу*.

2. **Трение качения.** Если же одно тело не скользит, а *катится* по другому, то трение, возникающее при этом, называют **трением качения**. При движении колес вагона, автомобиля, при перекатывании круглых бревен или бочек по земле проявляется трение качения. При качении шероховатость соприкасающихся поверхностей влияет значительно меньше, чем при скольжении, *рис. 107.2; 108.2*. При равных нагрузках трение качения всегда многократно меньше трения скольжения. В этом можно убедиться, положив под книги две круглые палочки и измерив силу трения качения динамометром. Она оказывается значительно меньше силы трения при скольжении. Именно поэтому еще в древности, до изобретения колеса, люди применяли катки для перетаскивания грузов, *рис. 102.2б*.

Изобретение колеса относится к наиболее важным изобретениям – оно оказало огромное влияние на развитие человеческой цивилизации.

Сравнить трение скольжения и качения можно и без динамометра. Положите наклонно кусок фанеры (картона, доску, книгу). На такую наклонную плоскость положите круглую палочку (круглый карандаш, пузырёк и т. п.) так,

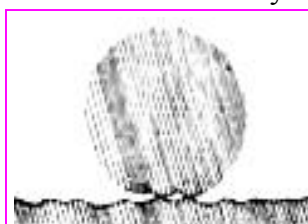
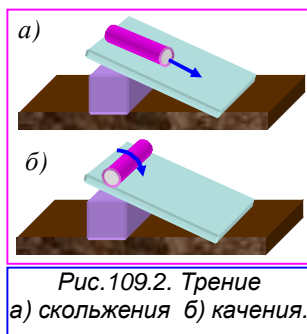


Рис.107.2. Влияние шероховатости соприкасающихся поверхностей при качении значительно меньше



Рис.108.2. Лучше катить, чем тянуть!

как показано на рис. 109.2а. Угол наклона подберите так, чтобы палочка медленно соскальзывала с плоскости. А теперь разверните палочку так, как показано на рис. 116.2б. Чувствуете разницу?



Вопросы

1. Какие известные вам наблюдения и опыты показывают, что существует сила трения?
2. Какую силу называют силой трения? В чем заключаются причины трения?
3. Как смазка влияет на силу трения? Объясните это.
4. Какие виды трения вы знаете?
5. В каких случаях говорят о трении скольжения?
6. Какое трение называется трением качения?
7. Как можно измерить силу трения?
8. Как показать, что сила трения зависит от силы, прижимающей тело к поверхности?
9. Как показать на опытах, что при равных нагрузках сила трения скольжения больше силы трения качения?

§ 39.2. ТРЕНИЕ ПОКОЯ

Мы ознакомились с силой трения, возникающей при движении одного тела по поверхности другого. Но можно ли говорить о силе трения между соприкасающимися твердыми телами, когда эти тела находятся в покое?

На рис. 102.2в шкаф находится в покое на горизонтальной плоскости. Попробуем его передвинуть. Если на шкаф нажать слабо, то он не тронется с места. Почему? Действующая сила в этом случае уравнивается силой трения ножек шкафа о пол.

Когда человек находится в покое на вертикальном стволе дерева, рис. 110.2, или тюки на наклонной ленте транспортера, рис. 111.2, они удерживаются силой трения. Действительно, если бы не было трения, то они под действием силы тяжести соскользнули бы вниз.

В метро сила трения разгоняет и тормозит пассажиров, покоящихся относительно сидений и пола вагонов.

На рис. 110.2 сила трения $F_{тр}$, удерживающая человека, направлена вверх. Она уравнивает силу его веса F_g , действующую вниз и стремящуюся вывести человека и дерево из относительного покоя. На рис. 111.2 тюки удерживаются на ленте транспортера силой трения покоя, направленной параллельно ленте транспортера вправо и вверх.

Во время ходьбы мы отталкиваемся от земли с силой F_M . Это наше действие на землю вызывает её противодействие в виде силы трения $F_{тр}$, действующей на подошву ноги, рис.112.2. При этом подошва ноги находится в относительном покое относительно земли. Сила трения $F_{тр}$ направлена вперед, а мышечная сила F_M – назад. Если поверхность земли покрыта скользкой коркой льда, эти силы малы. Поэтому по скользкой поверхности приходится двигаться медленно. Если бы не было трения покоя, невозможно было бы отталкиваться от земли – мы просто не могли бы ходить.

В приведённых примерах сила трения $F_{тр}$ препятствует телам придать относительное движение. Поэтому ее принято называть силой трения покоя. Сила трения покоя $F_{тр}$ направлена против того движения, которое должно было бы возникнуть. Сила трения покоя – это противодействие, возникающее при попытках вывести тело из

Рис. 110.2. Человек не падает с пальмы благодаря трению покоя.

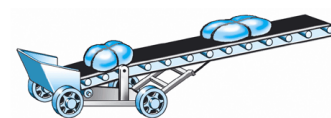


Рис.111.2. Транспортер поднимает тюки с хлопком, которые удерживаются на ленте транспортера силой трения покоя.



Рис. 112.2. Не будь трения покоя, невозможно было бы оттолкнуться от земли.

состояния относительного покоя. Наибольшая сила трения покоя будет равна по величине той силе, которая выводит тело из состояния покоя.

Вопросы



1. Приведите примеры, доказывающие существование трения покоя.
2. При каком условии возникает сила трения покоя?
3. Приведите примеры практического использования силы трения покоя.

§ 39.3. ТРЕНИЕ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Трение имеет большое значение в природе и технике. *Трение может быть полезным и вредным.* Когда оно полезно, его стараются увеличить, когда вредно – уменьшить. Рассмотрим некоторые примеры. Без трения покоя ни люди, ни животные не могли бы ходить по земле. Действительно, при ходьбе мы отталкиваемся ногами от земли. Если бы не было трения, мы не могли бы ходить. Когда же трение между подошвой обуви и землей (или льдом) мало, например в гололедицу, то отталкиваться от земли очень трудно, ноги при этом скользят. Чтобы ноги прохожих не скользили, тротуары посыпают песком. Это увеличивает силу трения между подошвой обуви и льдом.

Не будь трения, предметы выскальзывали бы из рук.

Сила трения останавливает автомобиль при торможении. Без трения покоя он не смог бы и начать движение. Колеса вращались бы, проскальзывали, а автомобиль продолжал бы стоять на месте. Чтобы увеличить трение, поверхность шин у автомобиля делают с ребристыми выступами, протекторами (рис. 113.2.). Зимой, когда дорога бывает особенно скользкая, на колеса автомобиля надевают специальные цепи.

У многих растений и животных имеются специальные органы, служащие для хватания (усики у растений, хобот у слона, цепкие хвосты у лазающих животных). Все они имеют форму, удобную для завивания, и шероховатую поверхность для увеличения трения.

Подумайте и немного пофантазируйте: что бы произошло со всеми нами, если бы в природе вдруг исчезло трение?

Но мы уже говорили, что *во многих случаях трение вредно* и с ним приходится бороться. Например, во всех машинах из-за трения нагреваются и изнашиваются движущиеся части. Для уменьшения трения соприкасающиеся поверхности делают гладкими, между ними вводят смазку. Чтобы уменьшить трение вращающихся валов машин и станков, их опирают на *подшипники*. Деталь подшипника, непосредственно соприкасающуюся с валом, называют *вкладышем*. Вкладыши делают из твердых материалов – бронзы, чугуна или стали. Внутреннюю поверхность их покрывают особыми материалами, чаще всего баббитом, и смазывают. На рис. 114.2 изображен подшипник, в котором вал при вращении скользит по поверхности вкладыша. Подшипники такого рода называют *подшипниками скольжения*. В таких подшипниках вращаются оси железнодорожных вагонов и локомотивов, тяжелые роторы турбин электростанций, валы двигателей автомобилей и самолётов.

Мы знаем, что сила трения качения при одинаковой нагрузке значительно меньше силы трения скольжения. На этом явлении основано применение *шариковых и роликовых подшипников*. В таких подшипниках вращающийся



Рис. 113.2. Протектор на автомобильных шинах увеличивает сцепление с дорогой, уменьшая опасность езды.

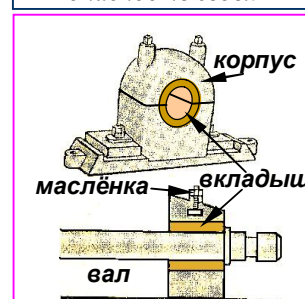


Рис. 114.2. Так устроены подшипники скольжения.

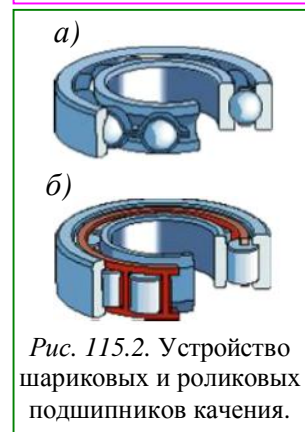


Рис. 115.2. Устройство шариковых и роликовых подшипников качения.

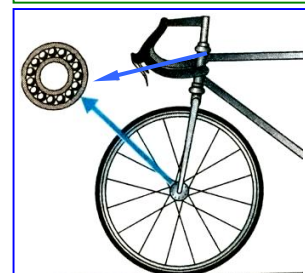


Рис. 116.2. шариковые подшипники в колёсах, рулевом и педальном устройствах велосипедов.

вал не скользит по неподвижному вкладышу подшипника, а катится по нему на стальных шариках или роликах.

Устройство простейших шарикового и роликового подшипников изображено на *рис.115.2*. Внутреннее кольцо подшипника, изготовленное из твердой стали, насажено на вал. Наружное же кольцо закреплено в корпусе машины. При вращении вала внутреннее кольцо катится на шариках или роликах, находящихся между кольцами.

Замена в машинах подшипников скольжения шариковыми или роликовыми подшипниками позволяет уменьшить силу трения в 20 – 30 раз.

Шариковые и роликовые подшипники используют в разнообразных машинах: автомобилях, токарных станках, электрических двигателях, велосипедах (*рис. 116.2*) и т. д. Без этих подшипников невозможно представить современную промышленность, приборы и транспорт.

Подшипники качения бывают очень большими – более метра диаметром (в поворотных механизмах разводных мостов) и совсем маленькими, микроскопических размеров (в приборах самолётов и ракет).

Так называемым «внутренним трением» – вязкостью обладают жидкости и газы. Жидкие масла, а в некоторых случаях вода и даже воздух используются для смазки трущихся поверхностей.

Вопросы



1. Какое значение имеет трение в жизни человека и животных?
2. Каково значение трения на транспорте?
3. Какие способы уменьшения трения вы знаете?
4. Для какой цели используют в машинах подшипники?
5. Как устроен подшипник скольжения? Шариковый подшипник? Какой из них заметнее уменьшает трение?
6. Приведите примеры, показывающие, что трение может быть полезным.
7. Каково значение трения на транспорте?
8. Приведите примеры, когда трение может быть вредным.
9. Какие способы увеличения и уменьшения трения вы знаете?

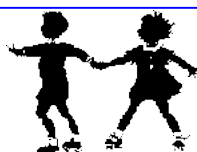


Задание

Попробуйте придумать рассказ о том, что было бы, если бы трения не было. А могло ли это быть в действительности? Почему?



Рис. 117.2. Ни будь трения, невозможно было бы держать котёнка. Стена из камней рассыпалась бы. Машина упала бы в яму. Шнурки не держались бы в обуви. На скрипке нельзя было бы издавать звуков.



А нам трение не мешает!



Приложение №1 к Главе 2

О ФУНДАМЕНТАЛЬНОМ ТРУДЕ И. НЬЮТОНА МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ

История написания

История создания этого труда начинается в 1682 году, когда прохождение кометы Галлея вызвало подъём интереса к небесной механике. Труд получил название «Математические начала натуральной философии», то есть, на современном языке, «Математические основы физики». В 1686 году первая книга «Математических начал» была представлена Королевскому обществу. Все три книги вышли в 1687 году.

Существует что-то вроде исторического анекдота. Студенты Кембриджа, встречая Ньютона, говорили: "Вот идет человек, написавший книгу, в которой ни он сам, ни кто другой ничего не понимает".

Краткое содержание труда

До Ньютона механику рассматривали двояко: как *некоторую геометрическую теорию*, и как *ремёсла, именуемые механическими*. Эти направления существовали обособленно друг от друга. Ремесленники опирались на собственный опыт и не интересовались теорией. То, что это ограничивает их возможности, они не осознавали.

Ньютон исходил из того, что теория может принести большую пользу, если она основана на практике: теория «за то и прославляется, что заимствовал извне столь мало основных положений, она столь многого достигает».

До Ньютона механика разрабатывалась «в виде учения о машинах, применяемых в ремеслах». Ньютон же исследовал природу, и своё сочинение рассматривал «как математические основания физики». В предисловии он писал: «Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления». «Механика есть учение о движениях, производимых какими бы то ни было силами, и о силах».

В первой главе *книги 1* «Начал» Ньютон определяет базовые понятия — **масса, сила, инерция** («врождённая сила материи»), **количество движения** и др.

Постулируются **абсолютность пространства и времени**, мера которых не зависит от положения и скорости наблюдателя. На основе этих понятий формулируются три закона механики Ньютона. Впервые даны общие **уравнения движения**, причём, если физика Аристотеля утверждала, что скорость тела пропорциональна движущей силе, то Ньютон вносит существенную поправку: «не скорость, а **ускорение**».

Методы доказательства, за редким исключением – геометрические, дифференциальное и интегральное исчисление явно не применяется (вероятно, чтобы не умножать число критиков), хотя понятия **предела** («последнего отношения») и **бесконечно малой**, с оценкой порядка малости, используются во многих местах.

Книга 2 посвящена движению тел на Земле, с учётом сопротивления среды. Здесь в одном месте (отдел II) Ньютон, в виде исключения, использует аналитический подход для доказательства нескольких теорем и провозглашает свой приоритет в открытии «**метода флюксий**» (*дифференциального исчисления* – раздела математики, в котором изучаются понятия **производной** и **дифференциала** в их применении к исследованию функций).

Ньютон писал: «В письмах, которыми около десяти лет тому назад я обменивался с весьма искусным математиком *г-ном Лейбницем*, я ему сообщал, что обладаю методом для определения максимумов и минимумов, проведения касательных и решения тому подобных вопросов... Знаменитейший муж отвечал мне, что он также напал на такой метод и сообщил мне свой метод, который оказался едва отличающимся от моего, и то только терминами и начертанием формул».

В *третьей* книге «математически выводятся силы тяготения тел к Солнцу и отдельным планетам. По этим силам, также при помощи математических предположений, выводятся движения планет, комет, Луны и моря».

Ньютон формулирует свой вариант «бритвы Оккама»¹: «Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений... Природа ничего не делает напрасно, а было бы напрасным совершать многим то, что может быть сделано меньшим. Природа проста и не роскошествует излишними причинами».

В соответствии с этим принципом Ньютон из опытных данных о планетах, Луне и других спутниках выводит **закон тяготения**. Для проверки того, что сила тяжести (вес) пропорциональна массе, Ньютон провёл несколько довольно точных опытов с маятниками. Подробно изложена теория движения Луны и комет. Объяснены (с помощью теории возмущений) существование равноденствий и неправильности (невязки) в движении Луны — как известные в древности, так и позднее установленных (Тихо Браге, Флемстид). Приведен способ определения массы планеты, причём масса Луны найдена по высоте приливов.

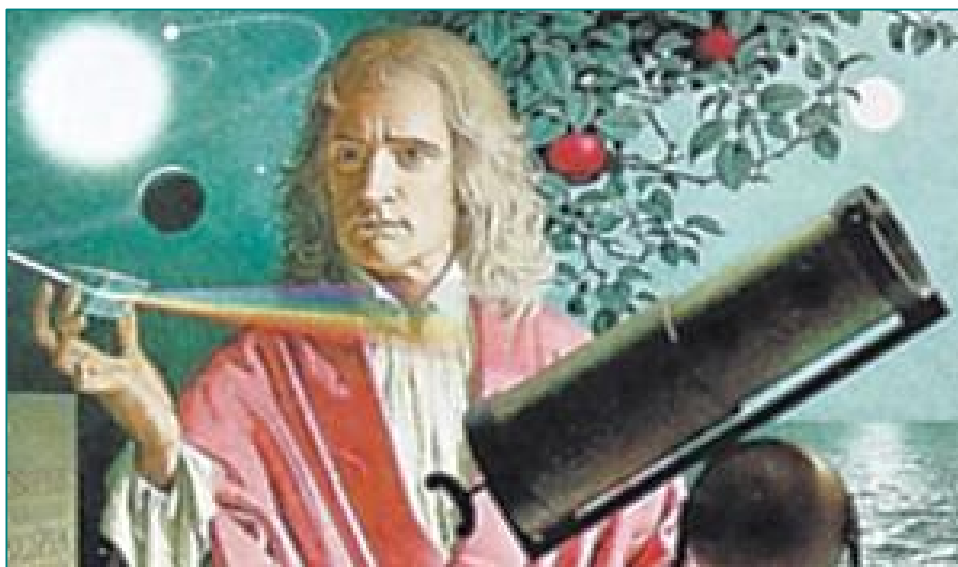
Критика

Выход в свет «Начал», заложивший фундамент теоретической физики, вызвал огромный резонанс в научном мире. При жизни Ньютона работа выдержала три издания.

Наряду с восторженными откликами были и резкие возражения, в том числе от известных учёных. Сторонники Декарта в Европе обрушились на неё с яростной критикой. Три закона механики особых возражений не вызвали, в основном критиковался Закон всемирного тяготения. Природа тяготения, действовавшего через совершенно «пустое» пространство была непонятна. Критики указывали также на то, что теория движения планет на основе закона тяготения имеет недостаточную точность, особенно для Луны и Марса.

Книга Ньютона была *первой работой по новой физике* и одновременно одним из последних серьёзных трудов, использующих старые методы математического исследования. Все последователи Ньютона уже использовали мощные методы математического анализа. В течение всего XVIII века аналитическая небесная механика интенсивно развивалась, и со временем все упомянутые выше расхождения были полностью объяснены взаимовлиянием планет.

С этого момента и вплоть до начала XX века все законы Ньютона считались незыблемыми. Физики постепенно привыкли к дальнодействию через «пустое» пространство. Природа тяготения раскрылась только с появлением работ Эйнштейна по Общей теории относительности.



¹ Уильям Оккама (1285-1349). В современной науке под «бритвой Оккама» обычно понимают принцип, утверждающий, что если существует несколько логически непротиворечивых определений или объяснений какого-либо явления, то следует считать верным самое простое из них.

ЯВЛЕНИЕ ПРИЛИВОВ И ОТЛИВОВ НА ЗЕМЛЕ ОБУСЛОВЛЕНО ГРАВИТАЦИОННЫМ ВЛИЯНИЕМ ЛУНЫ

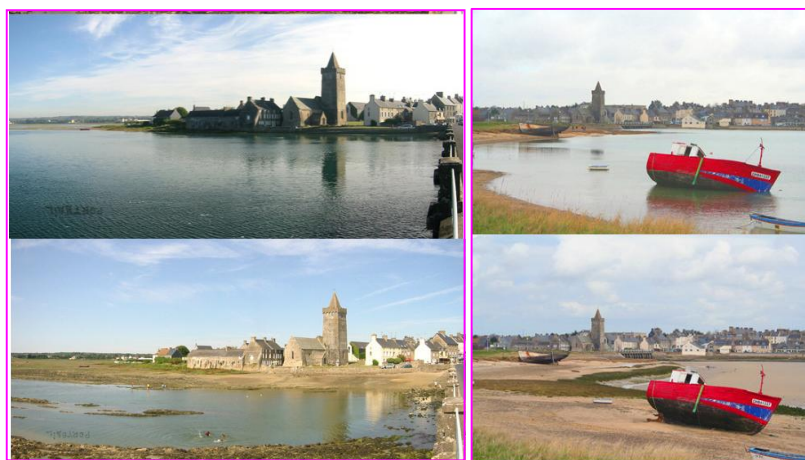


Рис.1.2п. Так выглядят прибрежные места, где происходят приливы и отливы.

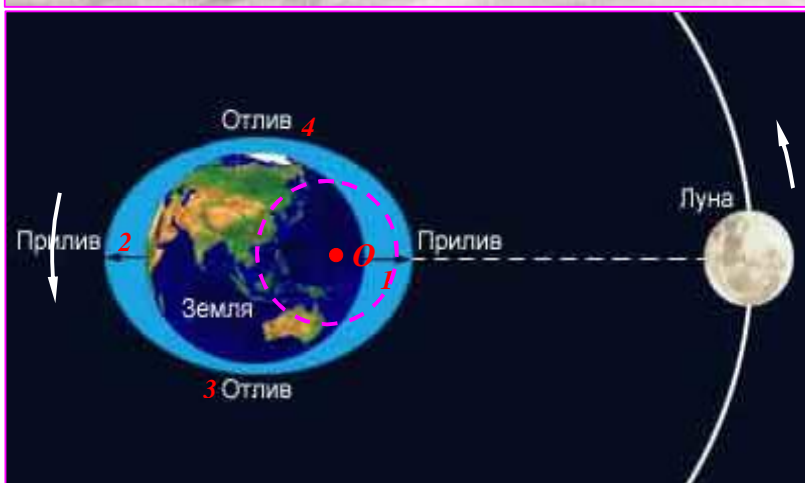


Рис.2.2п. Связанные тела (держат ли они друг за друга или притягиваются силами гравитации) вращаются по орбитам вокруг обшей оси $O-O$, проходящей через их центр масс (точку O). Это относится как к танцующим на льду, так и к Земле с Луной: и те и другие при каждом обороте пролетают мимо друг друга.

Влияние притяжения Луны вызывает в Мировом океане приливы и отливы. В открытом океане высота прилива невелика – около 1 м, но в узких бухтах, где приливная волна, идущая из океана, сильно повышается, высота прилива может превышать 10 м. В Атлантическом океане, в заливе Фанди, прилив достигает высоты 16-17 м, в Охотском море, в Гижигинской губе, высота прилива – 12-14 м. Если берега океана достаточно пологие (например, во Франции, рис.1), подъём воды во время прилива может на многие километры изменять положение границы суши и моря.

Явление приливов и отливов нашим предкам представлялось таинственным, хотя кое-кто из них и раньше догадывался, что Луна притягивает воду под собой и получается прилив. Но они не были так умны, как Ньютон, и думали, что должен быть только один прилив в сутки. Считалось, что Луна притягивает воду, вызывая прилив, но так как Земля вращается, то в каждом месте вода должна раз в сутки подняться и опуститься. А на самом деле прилив бывает каждые 12 часов (точнее – каждые 12 ч. 25 мин за счёт орбитального движения Луны).

Настоящее объяснение, данное Ньютоном, примерно таково.

Посмотрите на рис. 83.2 и 84.2 §32, а также рис.2 данного Приложения. На них видно, что вращение связанных тел (человек с грузом на верёвке; Земля и Луна, связанные гравитационным притяжением; держащие друг друга партнёры на льду)

происходит вокруг оси $O-O$, проходящей через обшей центр масс O . Каждая частичка этих

тел стремится двигаться прямолинейно, но связи (верёвка, гравитационное притяжение, руки партнёров) тянут их к оси, заставляя двигаться по круговым орбитам. При этом, например, «сухая часть» Земли испытывают небольшие деформации растяжения (как верёвка на рис. 83.2), а воды земных океанов перетекают в направлениях от оси *O-O*, создавая приливы в областях **1**; **2**, и отливы в областях **3**; **4**.

Приливы в областях **1** и **2** можно объяснить и несколько иначе, учитывая, что Земля находится в поле притяжения Луны в соответствии с формулой Ньютона [9.2] для пары тел «Земля – Луна». Расстояние от центра Луны до центра (и областей 3; 4) Земли составляет r ($\cong 384\,000$ км), а до областей **1** и **2** соответственно $r \pm R_3$. Здесь R_3 – радиус Земли ($R_3 \cong 6\,000$ км), так что $r/R_3 \cong 64$. Поэтому и средняя сила тяжести масс воды мирового океана в областях **3**; **4** отличается от силы тяжести в областях **1** и **2**. В областях **3**; **4** она имеет среднее значение ($\sim 1/r^2$), а в областях **1** и **2** минимальное и максимальное соответственно ($\sim 1/(r \pm R_3)^2$).

Таким образом, притяжение Луной земных суши и воды в центре Земли и областях **3** и **4** имеет некоторое среднее значение. Но притяжение Луной тех масс воды, которые находятся на «лунной» стороне Земли (в области **1**), *сильнее*, чем среднее притяжение всей Земли, а притяжение масс воды на обратной стороне Земли (в области **2**) *слабее* среднего. Кроме того, в отличие от суши *вода может течь*. Поверхность мирового океана принимает форму эллипсоида, большая ось которого обращена в сторону Луны. Земля вращается вокруг своей оси. Поэтому по поверхности океана навстречу направлению вращения Земли перемещается приливная волна. Когда она приближается к берегу — начинается прилив.

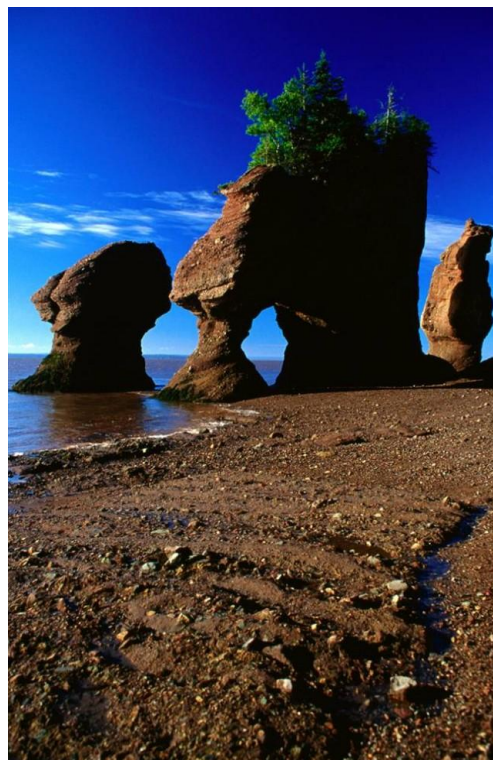
Истинная причина приливов и определяется этими двумя факторами, *рис. 2*.

Приливные волны тормозят вращение Земли. Правда, эффект очень мал. За 100 лет земные сутки увеличиваются на тысячную долю секунды. Но, действуя миллиарды лет, силы торможения приведут к тому, что Земля будет повернута к Луне все время одной стороной, и земные сутки станут равными лунному месяцу. С Луной это уже произошло. Луна заторможена настолько, что повернута к Земле все время одной стороной.

Аналогичным образом на Землю действует, конечно, и Солнце. Но его действие почти одинаково на все, находящееся на Земле и внутри нее. Сила, с которой Солнце притягивает, например, москвича в полдень, когда он ближе всего к Солнцу, почти не отличается от силы, действующей на него в полночь. Поэтому вызываемые Солнцем на Земле приливные явления, гораздо слабее. Это обусловлено тем, что расстояние от Земли до Солнца ($r \cong 150\,000\,000$ км) чрезвычайно велико по сравнению с радиусом Земли (в данном случае $r/R_3 \cong 25\,000$).



Приливная волна в океане

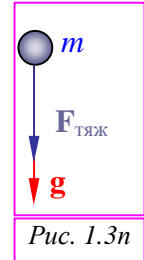


*Залив Фанди в
Атлантическом океане*

О ДВИЖЕНИИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Движение материальной точки вблизи поверхности Земли

Рассмотрим движение материальной точки (массой m) вблизи поверхности Земли. Мы знаем, что в этом случае на любое тело действует сила тяжести $F_{\text{тяж}} = mg$ (где g – ускорение свободного падения; m – масса тела). Оба вектора ($F_{\text{тяж}}$ и g) всегда направлены вертикально вниз, *рис. 1.3п*.



Однако чтобы определить траекторию движения тела, необходимо задать начальное *механическое состояние* тела – его *начальное положение* (координаты x_0 ; y_0) и *начальную скорость* v_0 . Индекс «0» здесь означает, что эти параметры относятся к начальному моменту ($t_0=0$) наблюдения за движением тела.



Рис. 2.3п. Все траектории полёта материальной точки вблизи поверхности Земли (когда поверхность можно считать плоской) – это кривые, называемые **параболами**. Чем больше величина начальной скорости – тем дальше пролетит тело до падения на Землю. При $v_0 = 0$ тело просто падает вертикально вниз. При очень большой начальной скорости ($v_0 \rightarrow \infty$) траектория полёта тела приближается к горизонтальной прямой.

Так летит тело, *рис. 2.3п*, брошенное горизонтально, с различными начальными скоростями v_0 . Такие кривые называются параболы (точнее, в данном случае это «половинки» парабол).

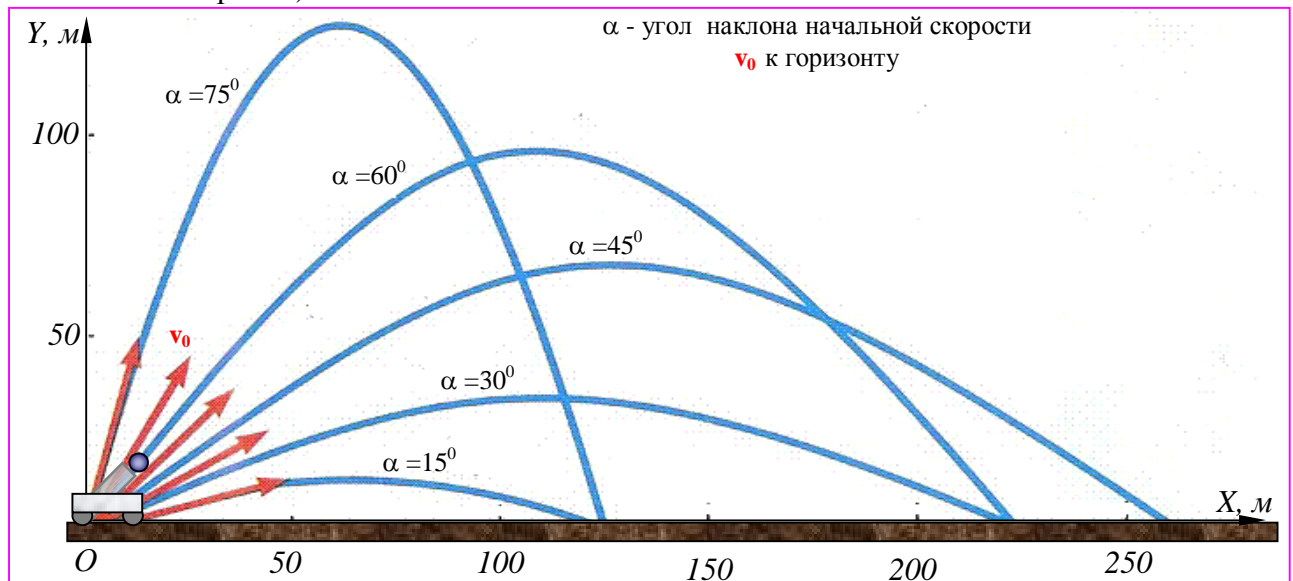


Рис. 3.3п. Траектории полёта тела (пушечного ядра) с начальной скоростью $v_0 = 50$ м/с, направленной под разным углом к горизонту. Наибольшая дальность полёта ядра достигается при выстреле под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту. Эти траектории – тоже всегда **параболы** («полные» параболы).

Так летит брошенный под углом к горизонту камень или снаряд при выстреле под углом к горизонту α (сопротивление воздуха не учитывается), *рис. 3.3п*.

Таким образом, любое тело, летящее в поле сил тяжести «плоской» Земли постоянно испытывает ускорение свободного падения g и всегда летит по кривым, называемым **параболами**.

Движение материальной точки с большими начальными скоростями

Если тело имеет достаточно большую начальную скорость, оно может пролететь очень большое расстояние (сравнимое с радиусом Земли $R_3=6375$ км), или даже вообще не упасть на Землю. В таких случаях следует учитывать, что Земля имеет форму шара. В этом случае на тело также всё время действует сила тяжести $F=mG$, и оно испытывает ускорение свободного падения $G \leq g$ ($g=9,8$ м/с²), направленное к центру Земли по её радиусу.

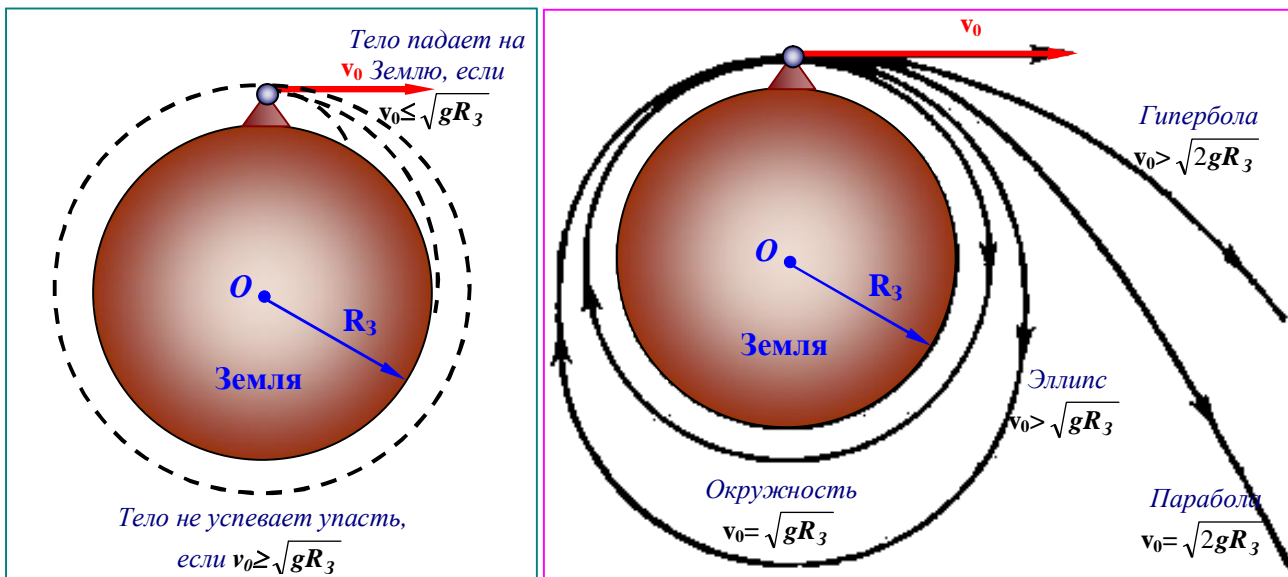


Рис. 4.3п. Если стрелять из пушки с горы, то ядро с увеличением начальной скорости v_0 будет лететь, а стало быть, и падать на Землю все дальше и дальше от пушки, пока при первой космической скорости 7,9 км/с не начнет облетать земной шар и превратится в спутник Земли. Сначала это будет движение по кругу. Дальнейшее увеличение v_0 приведет к движению по эллиптическим орбитам, которые будут всё более и более «вытягиваться», пока не превратятся (при второй космической скорости – около 11,2 км/с) опять в параболу – незамкнутую траекторию. После этого тело безвозвратно покинет гравитационное поле Земли и, по гиперболической траектории уйдет за его пределы.

Однако эти величины уже нельзя считать постоянными, если тело удаляется от Земли на расстояния h , сравнимые с её радиусом R_3 (ведь $G = g$ только вблизи поверхности небесного тела!). Формы траекторий в этом случае более многообразны.

Так летают баллистические межконтинентальные ракеты, спутники земли и космические корабли, а также ракеты, посланные на другие планеты.

Геостационарные спутники связи

Геостационарные спутники связи находятся на высоте около 36000 км, над экватором (именно поэтому все антенны направлены в южном направлении), рис. 5.3п. Их период обращения вокруг земного шара в точности равен земным суткам – они вращаются вместе с Землёй. Поэтому для нас они неподвижны, а их положение характеризуется лишь одной координатой – долготой (меридианом, над которым находится спутник над

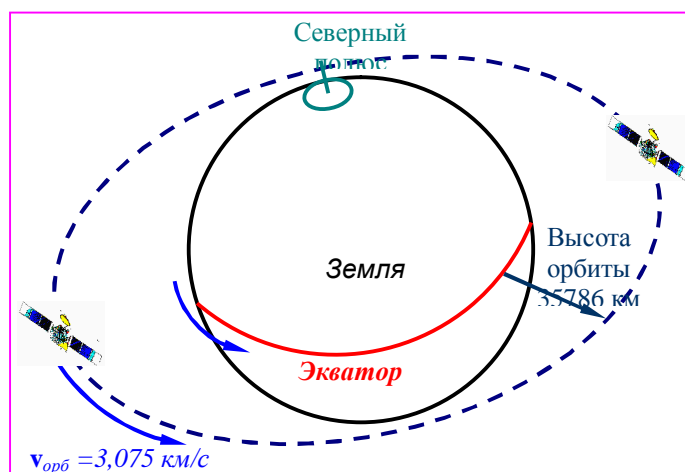
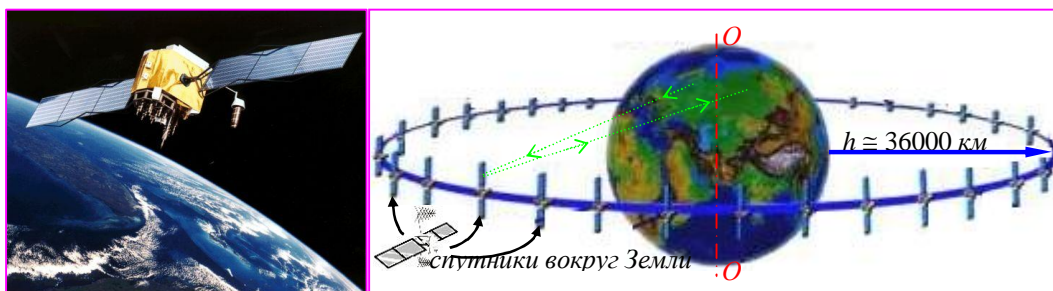


Рис. 5.3п. Так расположена орбита «висящих» спутников.

экватором). Таких спутников сейчас очень много, *рис. 6.3п*. Они неподвижны относительно



*Рис. 6.3п. Справа показан один из современных спутников связи. Обычно это геостационарные спутники, которые «висят» вокруг Земли, см. справа. Они неподвижны для наблюдателя, находящегося на Земле. Они всё время принимают и отправляют наши электромагнитные сигналы. Так работает *мобильная связь, телевидение, интернет*.*

атмосферы и не испытывают трения. Поэтому они могут очень долго находиться на орбите.

Свобода... в падении? Да, пока не упадёте!

Ещё Галилей в XVII в. писал: *«Мы ощущаем груз на наших плечах, когда стараемся мешать его падению. Но если станем двигаться вниз с такой же скоростью, как и груз, лежащий на нашей спине, то как же может он давить и обременять нас?»*.

Все виды движения, которые мы рассматривали в **Приложении №3** происходили только под действием единственной силы – силы тяжести Земли $F_{\text{тяж}}$ (сопротивление воздуха не учитывалось). Телу сообщалась начальная скорость v_0 , а далее тело просто свободно **падало** на Землю. Имеет ли это тело (или те, кто на нём находятся) вес? Ведь «нет опоры (подвеса) – нет веса!». Следовательно, *все случаи свободного падения создают невесомость*.

Невесомость испытывают космонавты, после того как перестают работать ракетные двигатели; в кратковременной невесомости находитесь и вы, когда просто подпрыгиваете.

На реальное движение тел, кроме силы тяжести, всегда влияют силы сопротивления.

Если учесть силы сопротивления, движение тел в поле сил тяжести значительно усложняется. При падении тел в воздухе, скорость их не возрастает беспредельно, а стремится к постоянной величине, при которой сила тяжести уравновешивается силой сопротивления, возрастающей с увеличением скорости. Траектория падения тела при этом может качественно измениться, *рис. 7.3п*. Если же падение тел происходит в вакууме (например, в трубке Ньютона), сопротивление воздуха отсутствует, и тяжелая дроби́нка и перо падают с одинаковой скоростью по вертикальной прямой, *рис. 8.3п*. При падении человека сила сопротивления воздуха достигает величины силы тяжести при скорости около 70 м/с.

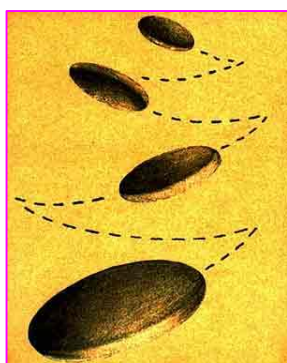


Рис. 7.3п. Траектория падающего листа – ломаная кривая

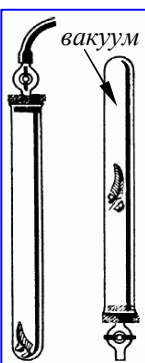


Рис. 8.3п. Трубка Ньютона



Рис. 9.3п. При падении без парашюта скорость человека возрастает приблизительно до 50 -70 м/с



Рис. 10.3п. Скорость падения с парашютом ≈ 5 м/с

Приложение №4 к Главе 2

«Единственное, чему научила меня моя долгая жизнь: что вся наша наука перед лицом реальности выглядит примитивно и по-детски наивно — и все же это самое ценное, что у нас есть».

А. Эйнштейн

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ МЕХАНИКИ ГАЛИЛЕЯ – НЬЮТОНА

Одним из основных понятий механики является понятие **материальной точки** (тела, формой и размерами которого можно пренебречь). Одна материальная точка от другой отличаются только величиной своей массы $m_1; m_2; m_3, \dots$, рис. 1.4п.

Материальные точки находятся в **пространстве** – «пустом ящике». Их положение в пространстве может быть определено только **относительно** одной из них, принятой за **тело (точку) отсчёта** (точка O). Это делается с помощью координат x, y, z (или радиус-вектора r), рис. 2.4п. При движении материальных точек их координаты изменяются со временем t .

Все точки такого «пустого», **свободного** пространства совершенно одинаковы – как при движении в любом направлении (**однородность** пространства), так и при любых поворотах (**изотропия** пространства), а **часы** (рис. 3.4п) отсчитывают время t через совершенно равные промежутки времени всегда и во всех системах отсчёта (**однородность** времени).

Уравнения механики Ньютона справедливы только в системах отсчёта, связанных с **инерциально (свободно)** движущимся телом O . Уравнение движения (уравнение второго закона Ньютона) позволяет предсказать положение системы материальных точек в последующие моменты времени, если задано **механическое состояние** системы материальных точек в данный момент времени и **силы**, которые на них действуют.

Задание координат ещё не определяет **«механического состояния»** системы в данный момент времени в том смысле, что оно не позволяет предсказать положение системы в последующие моменты времени. При заданных координатах, точки могут иметь произвольные скорости. Только **одновременное задание** всех **координат** и **скоростей** системы в принципе позволяет предсказать дальнейшее её движение.

В основе уравнений механики Ньютона лежат следующие идеи.

Если на какую-либо материальную частицу не действуют силы – попросту говоря, если материальную точку «не трогать», она будет продолжать прямолинейно двигаться с неизменной скоростью сама по себе (или продолжать покоиться).

Если же тело движется с ускорением, то на него обязательно действует какое-то другое тело – **сила**.

Невозможны покой или равномерное прямолинейное движение при наличии силы; невозможно ускоренное движение без действия силы.

Сила создается каким-нибудь телом, далеким или близким, большим или малым. С этим телом может быть непосредственный контакт, но может и не быть контакта. Но за каждой силой непременно «скрывается» какое-то тело или несколько тел.

Действия двух тел друг на друга равны между собой, направлены в противоположные стороны по одной прямой и имеют одинаковую физическую природу.

Следует иметь в виду, что для того, чтобы этими идеями можно было практически пользоваться, Ньютону пришлось разработать основы высшей математики и записать их в виде уравнений.

Такова, в общих чертах, модель механики Ньютона – Галилея.

Задачи естествознания, поставленные Ньютоном, потребовали разработки новых математических методов. Математика для Ньютона была главным орудием в физических исследованиях. Он подчёркивал, что математика является **частью** естествознания.

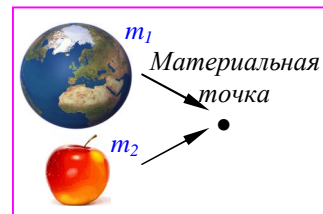


Рис. 1.4п. Любое тело (Землю или яблоко) можно представить материальной точкой.

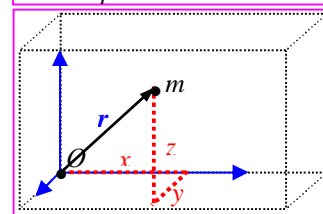


Рис. 2.4п. Все точки «пустого» ньютоновского пространства совершенно одинаковы.



Рис. 3.4п. Время t отсчитывают часы.

Словами три закона движения и закон всемирного тяготения можно сформулировать так:

1. При отсутствии внешних силовых воздействий тело (материальная точка) будет продолжать равномерно двигаться по прямой или покоится.

2. Ускорение движущегося тела (материальной точки) пропорционально сумме приложенных к нему сил и обратно пропорционально его массе.

3. Всякому действию возникает равное по величине и обратное по направлению противодействие той же физической природы.

Между всеми телами во Вселенной действуют силы взаимного притяжения.



Рис. 4.4п. Рассказывают, что И. Ньютон открыл законы классической механики, наблюдая за падающим яблоком.

Галилей (1564 – 1642) и Ньютон (1643 – 1727) создали основы механики – начало современной физики в мрачное время позднего средневековья, господства инквизиции в Европе. Примечательно, что приблизительно в это время творили: Леонардо да Винчи (1452 – 1519); Микеланджело Буонарроти (1475 – 1564); В. Шекспир (1564 - 1616); И. С. Бах (1685 – 1750).

Законы Ньютона – это инструменты, необходимые для понимания очень широкого круга явлений, происходящих в нашей Вселенной. И, невзирая на огромные достижения современной науки, произошедшие со времен Ньютона, чтобы спроектировать новый автомобиль или отправить космический корабль на Марс, вы воспользуетесь все теми же законами Ньютона. При запуске ракеты действуют все законы динамики Ньютона. Сначала ракета ускоряется, поскольку на нее воздействует сила реактивной тяги испускаемых газов (второй и третий законы Ньютона), а затем, после выхода на орбиту, движется по инерции в гравитационном поле Земли. Начиная с законов движения Ньютона, пошел отсчет истории современной физики и вообще естественных наук.

