

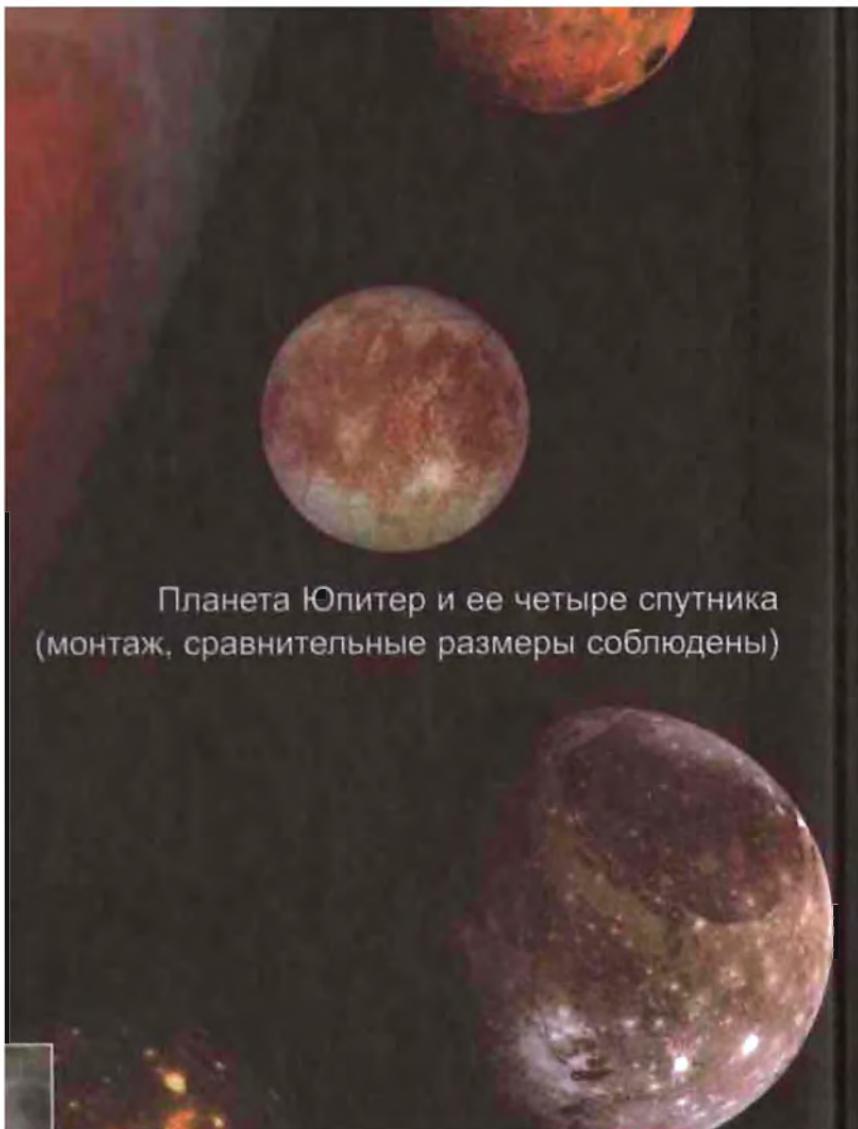


ФИЗИКА

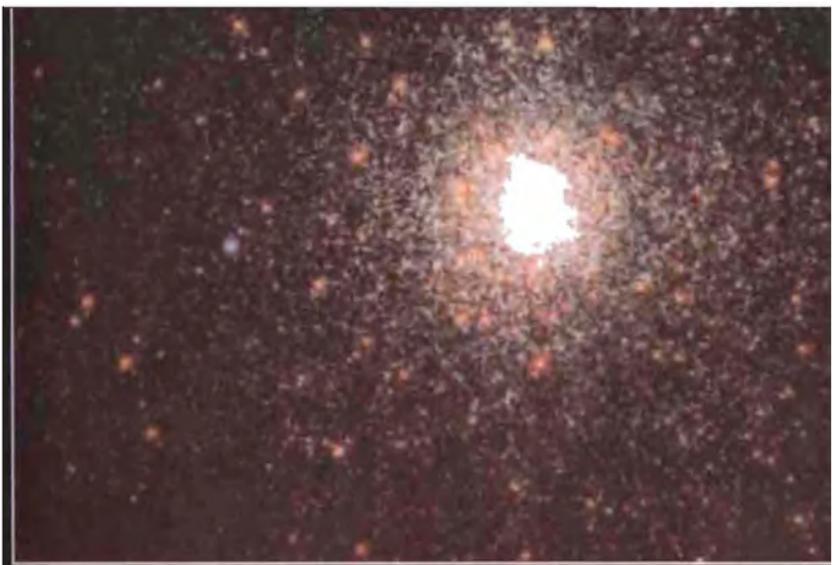


8





Планета Юпитер и ее четыре спутника
(монтаж, сравнительные размеры соблюдены)



Яркое шаровое скопление в созвездии Скорпиона
Гравитационное поле "сплотило" в этом скоплении
тысяч звезд



ФИЗИКА



8

**Механика
с основами общей астрономии**

**УЧЕБНИК ДЛЯ 8 КЛАССА
ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ**

Под редакцией А. А. Фадеевой

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 2002

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
Ф50

Авторы: А. А. Фадеева, Д. Ф. Киселев, А. В. Засов, Э. В. Кононович

Ф50 **Физика : Механика с основами общ. астрономии : Учеб. для 8 кл. общеобразоват. учреждений / А. А. Фадеева, Д. Ф. Киселев, А. В. Засов, Э. В. Кононович; Под ред. А. А. Фадеевой. — М. : Просвещение, 2002. — 239 с. : ил. —ISBN 5-09-010462-X.**

Данный учебный курс предполагается изучать на базе курсов «Естествознание, 5–6» под редакцией И. Т. Суравегиной, А. А. Фадеевой и «Естествознание, 5–7» под редакцией А. Г. Хрипковой. Курс может быть использован и самостоятельно.

Учебник знакомит с современными вопросами физики и астрономии, содержит много задач, практических и лабораторных работ. Текст учебника сопровождается большим количеством иллюстраций и таблиц.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 5-09-010462-X

© Издательство «Просвещение», 2002
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2002
Все права защищены

НАШ ЮНЫЙ ДРУГ!

Учебник «Физика, 8» посвящен механике – науке о механическом движении тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

Как и в учебнике «Физика, 7», большое внимание уделено рассмотрению единства законов Природы, применимости законов физики к небесным телам, живым организмам.

Учебник иллюстрирован рисунками, схемами и графиками, которые помогут вам лучше понять и запомнить материал.

При работе с учебником обратите внимание на принятые условные обозначения:

? Вопросы, на которые надо ответить после изучения параграфа или главы.

● Выполнить задание.
■ Решить задачу.
◆ Выполнить лабораторную работу или экспериментальное задание.

✳ Задания, вопросы или материал для любознательных.
✳ Обратить внимание.
✳✳ Запомнить.

Важные для осмыслиения и запоминания термины, понятия, определения выделены специальным шрифтом (курсивом), основные законы — полужирным шрифтом, основные формулы заключены в рамку.

Авторы надеются, что этот раздел физики позволит вам лучше понять окружающий мир и свое место в нем.

Терпения вам и удачи!

ЧТО ИЗУЧАЕТ МЕХАНИКА

Что объединяет тела живой и неживой природы? Из курса естествознания вам известно, что тела состоят из одних и тех же химических элементов и что тела живой и неживой природы, космические и земные, находятся в движении. Планеты, кометы, астероиды и другие тела Солнечной системы движутся вокруг Солнца; естественный спутник Земли – Луна обращается вокруг Земли. Колебания земной коры, воздушные и морские течения – все это примеры движения. Тела состоят из частиц (атомов, молекул и др.), которые непрерывно движутся. Обменные процессы в живых организмах – это тоже движение. В технике это движение различных летательных аппаратов и транспортных средств, частей двигателей, механизмов.

Вначале мы рассмотрим учение о геометрических свойствах движения тел – *кинематику* (от греч. κίνητα – движение). При движении тела взаимодействуют, в результате чего они могут изменять скорость или деформироваться. Основная мера взаимодействия тел – *сила*. Учение о движении тел под действием сил получило название *динамика* (от греч. δύναμις – сила). В динамике исследуются причины движения тел.

Учение о равновесии тел под действием сил – *статика* (от греч. στατική – учение о равновесии тел).

Наука о механическом движении тел и происходящих при этом взаимодействиях получила название *механика* (от греч. μηχανική – наука о машинах, искусство построения машин).

В разделе «Механика» рассмотрим движение и равновесие *макроскопических тел* (от греч. μακρός – большой, длинный; это слово относится к телам больших размеров).

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

ГЛАВА I. КИНЕМАТИКА

Прилепись паутинкой к звезде...
Повернись к мирозданью лицом.

Н. Заболоцкий

§ 1. СВЕДЕНИЯ О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ

Материя, пространство и время. Все, что реально существует в природе, все, что нас окружает, все, что мы можем ощущать непосредственно или с помощью специальных приборов, в науке называют *материей*. Одно из основных свойств материи – *движение*.

В разделе «Молекулярная физика» вы изучали движение и взаимодействие частиц, образующих тела. Вы узнали, что части-

ши вещества имеют размеры, массу, скорость. В различных агрегатных состояниях вещества частицы совершают непрерывное во времени движение.

Окружающие нас макроскопические тела также имеют определенную форму, размеры, массу, и они движутся. Некоторые примеры движения тел представлены на рисунке I.

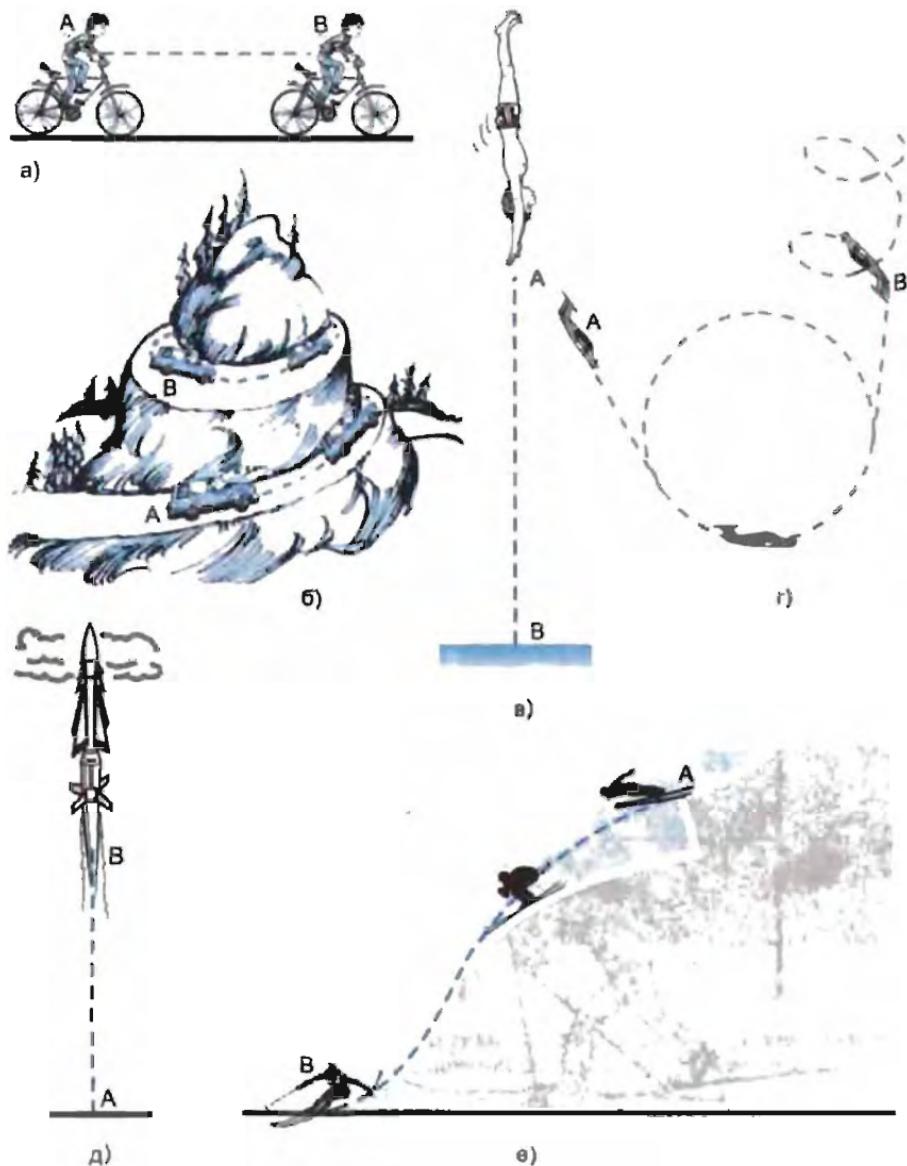


Рис. I. Разнообразные движения тел

Все движения происходят в пространстве и во времени. Пространство наделяется рядом свойств: оно *протяженно* и *трехмерно*. Основные свойства времени: оно *непрерывно* и *направленно* (время «текет» только вперед — от прошлого к будущему).

Пространство и время — основные понятия всех разделов физики, в том числе и механики. В дальней эти понятия играют важную роль в познании природы.

Траектория, путь и перемещение. Обратимся к рисунку 1, на котором штриховыми линиями показаны положения тел в разные моменты времени.

Линия, вдоль которой движется тело при своем движении, называется траекторией движения тела.

В зависимости от вида траектории движение может быть *прямолинейным* (рис. 1, а, в, д) и *криволинейным* (рис. 1, б, г, е).

Длина траектории (расстояние, пройденное телом вдоль траектории его движения) называется путем. Путь обозначается буквой латинского алфавита *s* (читается «ес»). В Международной системе единиц (СИ) эта величина измеряется в метрах (м). Путь — скалярная величина, т. е. имеет числовое значение, но не имеет направление в пространстве.

На рисунке 2, а представлена трасса соревнований по лыжным гонкам, на которой старт обозначен точкой *A*, а финиш — точкой *B*.

? Как называется линия, вдоль которой движется спортсмен во время соревнований?

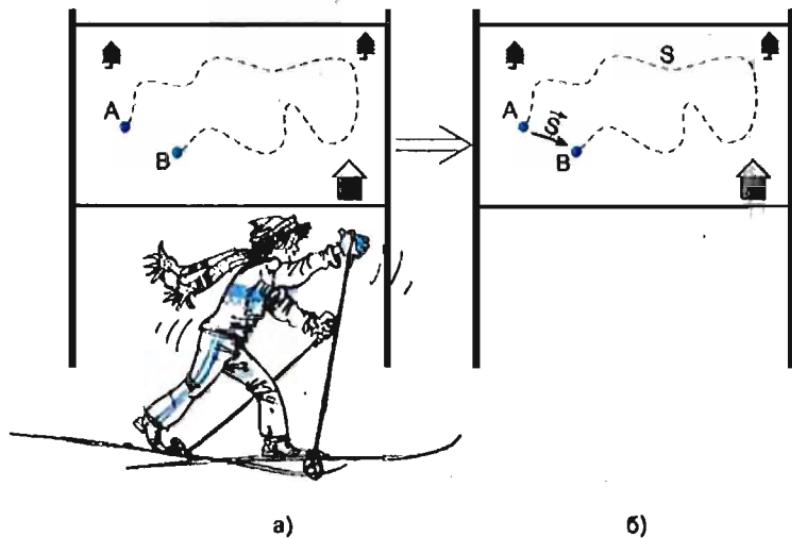


Рис. 2. Трасса соревнований

Направленный отрезок прямой, соединяющий начальное и конечное положения тел, называется перемещением.

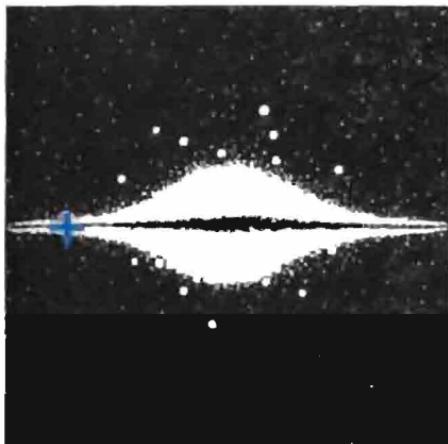
Перемещение — векторная величина, т. е. имеет направление и числовое значение (рис. 2, б). Перемещение обозначается так: \vec{s} . Модуль вектора перемещения записывается так: $|\vec{s}|$ или s . В Международной системе единиц (СИ) модуль вектора перемещения измеряется в метрах (м).

Механическое движение. В повседневной жизни вы наблюдаете, что вокруг много и неподвижных тел. Карандаш лежит на столе, стол стоит в комнате, комната размещена в доме, дом стоит на поверхности земли. Неподвижны и деревья, машины на автостоянке, неработающие краны на стройке и т. д. Эти и другие примеры, казалось бы, опровергают все, что было сказано ранее о движении. Но это не так! Дело в том, что неподвижные относительно поверхности Земли тела вместе с ней движутся вокруг ее оси и обращаются вокруг Солнца (рис. 3), а Солнечная система движется в нашей звездной системе — Галактике (рис. 4). Галактика также движется во Вселенной относительно других подобных ей звездных систем.

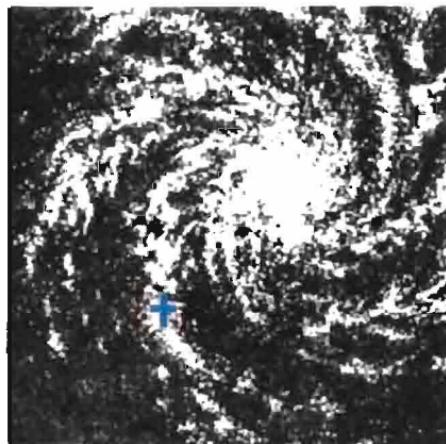


Орбита Земли

Рис. 3



а)



б)

Рис. 4. Схема строения нашей Галактики: а) вид с ребра; б) вид плашмя. Крестиком обозначено положение Солнечной системы. Расстояние от Солнечной системы до центра Галактики составляет 23—28 тыс. световых лет

Поскольку в разделе «Механика» будем рассматривать движение тел на поверхности Земли (или вблизи нее), то Землю условно будем считать неподвижной.

Механическим движением называется любое изменение положения тела (или частей этого тела) в пространстве с течением времени относительно других тел, условно принимаемых за неподвижные.

? 1. Как называется линия, по которой движется тело при своем движении? 2. Какова траектория движения лопастей вентилятора? 3. Какова траектория движения автомобиля на закругленном участке пути? 4. Что понимают под проиденным путем? перемещением тела? 5. Дайте определение механического движения. Приведите примеры механического движения.

● 1. На рисунке 5 изображены разнообразные движения тел. В каком случае траекторию движения тела можно считать прямолинейной, а в каком — криволинейной?

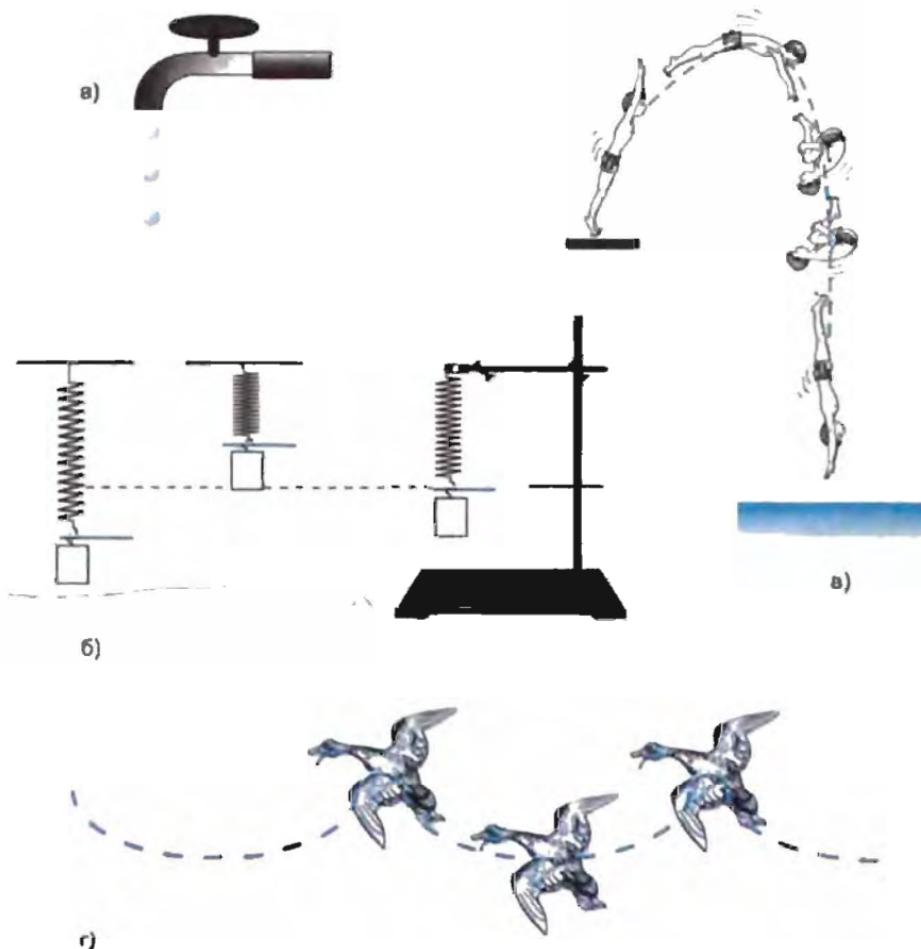


Рис. 5

2. Заполните таблицу 1 и укажите в последней графе различие между понятиями «путь» и «перемещение».

Таблица 1

| Понятие | Определение | Обозначение | Наименование | Различие понятий «путь» и «перемещение» |
|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------------------------------------|
| Путь | | | | |
| Перемещение | | | | |

3. В начале рабочего дня автобус вышел на маршрут, а вечером вернулся на автобазу. За рабочий день показание счетчика, установленного в кабине водителя, увеличилось на 150 км. Чему равны модуль перемещения и путь, пройденный автобусом?

4. На рисунке 6 показаны три положения качелей при их колебаниях. Изобразите схематично путь и перемещение в случаях, когда качели: 1) смещаются из положения 1 в положение 2; 2) смещаются из положения 1 в положение 3; 3) вернутся в положение 1, пройдя положения 2, 3, 2.

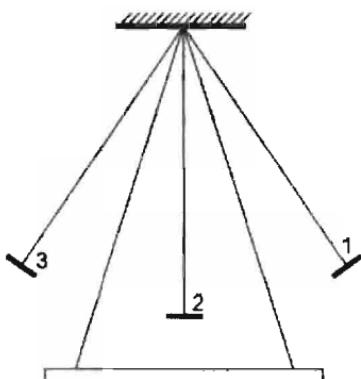


Рис. 6

Результаты всех наблюдений запишите в тетрадь.

◆ 1. Выпустите мяч из руки. Начертите траекторию движения мяча. Сравните путь и перемещение мяча. Выясните, относительно каких тел мяч движется.

2. Пронаблюдайте за движением шарика, скатывающегося с поверхности стола. Начертите траекторию движения шарика. Укажите на рисунке путь и перемещение шарика. Выясните, относительно каких тел шарик движется.

3. Прикрепите к гвоздику нить. Возьмите свободный конец нити и заставьте гвоздик вращаться в вертикальной плоскости. Начертите траекторию движения гвоздика. Относительно каких тел гвоздик движется?

4. Возьмите ластик в руку и подбросьте его вверх. Через некоторое время ластик упадет на вашу ладонь. Начертите траекторию движения ластика. Сравните путь и перемещение ластика. Относительно каких тел ластик движется?

§ 2. СИСТЕМА ОТСЧЕТА. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Что понимают под системой отсчета. Движение тела всегда относительно. Говорить о движении, не указывая, относительно каких тел наблюдается это движение, бессмысленно.

Тело (или группа тел), относительно которого изучается движение, называется телом отсчета.

Когда вы идете в школу, то любой дом, школьное здание, дерево, газетный киоск можно принять за тело отсчета. Но чтобы описать изучаемое движение, недостаточно выбрать только тело отсчета. Например, если мы хотим описать, как растет цветковое растение, взяв за тело отсчета земную поверхность, то должны знать, как меняется расстояние от поверхности земли до цветка. Однако и этого недостаточно, поскольку растение увеличивает свои размеры во всех направлениях. Поэтому с телом отсчета удобно связать *прямоугольную систему координат*. Тогда любое изменение положения тела (или частей этого тела) можно связать с перемещением относительно данной системы координат.

Всякое движение происходит в пространстве и во времени. Для измерения времени используют часы, а для измерения расстояний — линейку.

Тело отсчета, а также связанная с ним прямоугольная система координат и приборы для измерения времени (часы), расстояний (линейка) образуют систему отсчета.

Систему отсчета можно изобразить так, как показано на рисунке 7, а. В дальнейшем часы и линейку мы изображать не будем, а будем указывать только тело (точку) отсчета и прямоугольную систему координат (рис. 7, б).

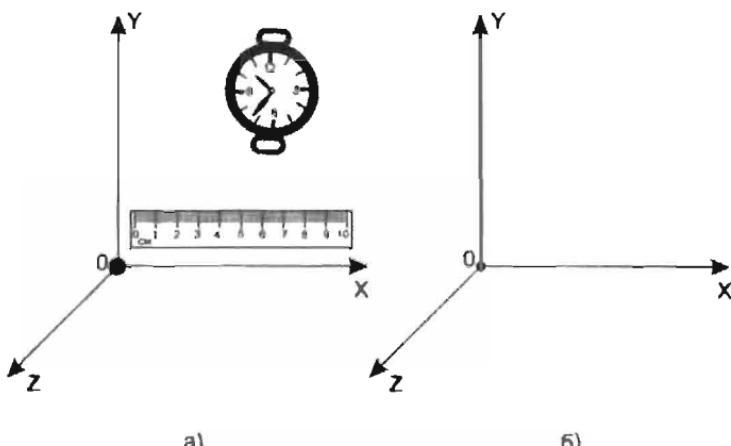


Рис. 7. Система отсчета: O — тело отсчета (начало координат); OX — положительное направление координатной оси X ; OY — положительное направление координатной оси Y ; OZ — положительное направление координатной оси Z

Система отсчета – абстрактное понятие, применяемое для описания движения реальных тел. Ее выбор зависит от целей исследования, т. е. он произволен.

Относительность движения. Для подтверждения того, что выбор системы отсчета произволен, приведем два примера.

Пример 1. Чемодан, лежащий в багажнике автомобиля, не перемещается относительно него, или, как говорят, неподвижен в системе отсчета, связанной с автомобилем. Тот же чемодан перемещается относительно дороги вместе с автомобилем (движется в системе отсчета, связанной с Землей).

Пример 2. Вы (или ваш друг) любите кататься на велосипеде. На рисунке 8, а, б штриховой линией показана траектория отметины, сделанной на колесе (точка А), в системе отсчета, связанной с рамой велосипеда (рис. 8, а) и Землей (рис. 8, б).

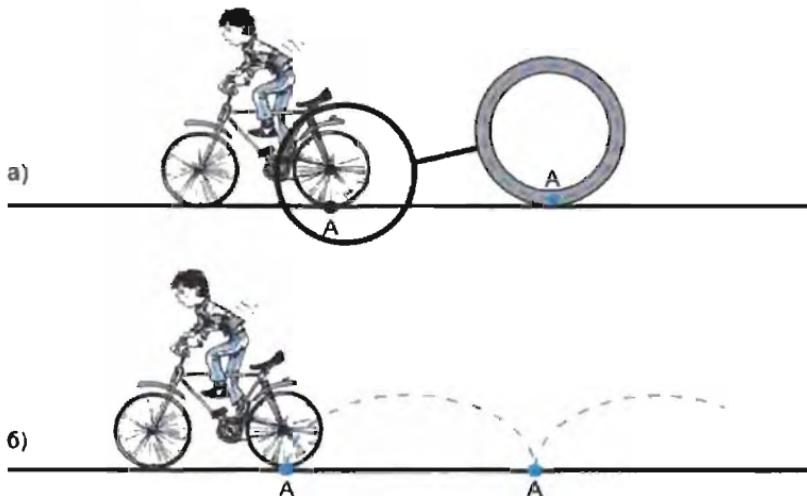


Рис. 8. Траектория отметины, сделанной на колесе велосипеда, в разных системах отсчета

? Какой вывод можно сделать из приведенных примеров?

Движение Земли и относительность движения. Если мы рассматриваем предметы, неподвижно находящиеся на поверхности земли (столб, дерево, дом и др.), то их покой не является абсолютным. Все, что находится на Земле, принимает участие в ее вращении вокруг оси. Благодаря этому вращению на нашей планете происходит смена дня и ночи. Ось вращения Земли при движении ее вокруг Солнца остается параллельной самой себе. Вместе с Землей все тела участвуют в ее сложном движении в пространстве. Земля движется вокруг Солнца, совершая полный

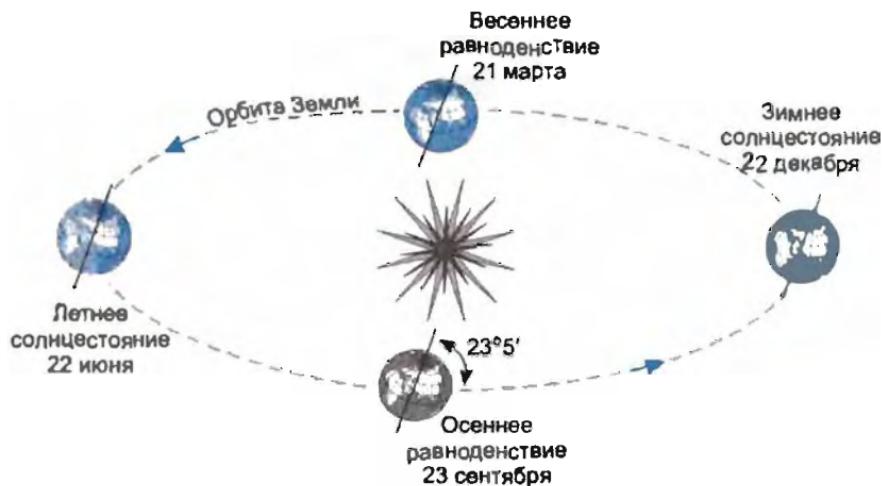


Рис. 9. Годичное движение Земли вокруг Солнца

оборот за год (рис. 9). Следствием движения Земли вокруг Солнца, наклона оси вращения Земли к плоскости орбиты и постоянства этого наклона является регулярная смена времен года на Земле.

Луна тоже заставляет двигаться Землю: под действием ее притяжения центр Земли описывает окружность радиусом почти 5000 км вокруг центра масс системы Земля–Луна с периодом, равным периоду обращения Луны вокруг Земли (около 27 сут).

Солнечная система вместе с Землей, Солнцем и планетами движется в пространстве. Она обращается вокруг центра нашей звездной системы – Галактики, совершая полный оборот примерно за 200 млн лет. Галактика, в свою очередь, движется относительно других звездных систем, других галактик. Во Вселенной нет таких тел, которые могли бы считаться абсолютно покоящимися. Движение относительно, поэтому и скорость, и траектория движения любого тела будут зависеть от того, с какими телами связана система отсчета.

Понимание того факта, что всякое движение относительно, сформировалось в науке только в Средние века, в эпоху Возрождения. До того времени абсолютная неподвижность Земли принималась

звезды, Луна, Солнце и планеты – вращающимися вокруг нее, будучи расположенными на концентрических оболочках – сферах. Так, древнегреческий ученый и философ Аристотель (384–322 гг. до н. э.) аргументировал неподвижность Земли тем, что если бы она двигалась как целое, то камень, брошенный вертикально вверх, упал бы уже на другое место, поскольку Земля

Аристотель (384—322 гг. до н. э.) — древнегреческий ученый-энциклопедист, занимался многими науками — от поэтики и политики до физики и биологии. В физических трактатах «Физика», «О происхождении и уничтожении», «О небе», «Механика» и др. изложил свои представления о природе и движении. Аристотель считал мир вечным и неизменным. Основной его постулат: все вещества состоят из четырех элементов — земли, воды, (своебразная система элементов). Предполагалось, что каждый элемент стремится занять свое естественное положение: земля и вода — внизу, воздух и огонь — вверху. Пятым, наиболее совершенным элементом считал эфир. Понятия пространства, времени и материи у Аристотеля взаимосвязаны и не существуют одно без другого. Под движением он понимал изменение вообще. Механические перемещения считались одним из видов движения. На основе умозаключений Аристотель приходит к выводу, что движение в пустоте невозможно.



«Неподалеку от Эсхина был Аристотель, князь мудрости; он стоял, сплетя пальцы рук, и, хотя он был изваян из беззвучной бронзы, казалось, что в нем живет деятельная мысль и воля, складки щек позволяли догадываться о сомнениях и раздумье, и живые глаза указывали на проницательный ум».

Христодор (VI в.)

успела бы сместиться под ним, а птицы, улетая, уже не смогли бы вернуться к своим гнездам. Восход и заход светил, казалось бы, с очевидностью говорили об их вращении вокруг Земли. Мы не ощущаем движение Земли непосредственно, на Земле все происходит так, как если бы она поколась. Поэтому лишь с большим трудом пришло понимание того, что сугочное движение звезд, Луны и Солнца логичнее объяснить вращением самой Земли вокруг оси.

Особую сложность и интерес представляли наблюдаемые движения планет. Еще в глубокой древности люди заметили, что, хотя планеты внешне неотличимы от звезд, их видимые пути на небе не совсем такие же. Планеты медленно перемещаются на фоне звездного неба. Отсюда и произошло слово «планета» (от греч. *planētēs* — блуждающая звезда). Римляне дали им имена своих богов: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Помимо суточного движения, планеты на фоне звезд описывают сложные петлеобразные пути (рис. 10), медленно перемещаясь то с запада на восток (прямое движение), то с востока на запад (попутное движение). Это обусловлено их истинным движением и движением Земли.

Ключ к пониманию устройства мира, окружающего Землю, лежал в объяснении странных движений планет. Для того чтобы найти объяснение петлеобразным движениям планет, продолжая считать Землю неподвижной, древнегреческие мыслители созда-

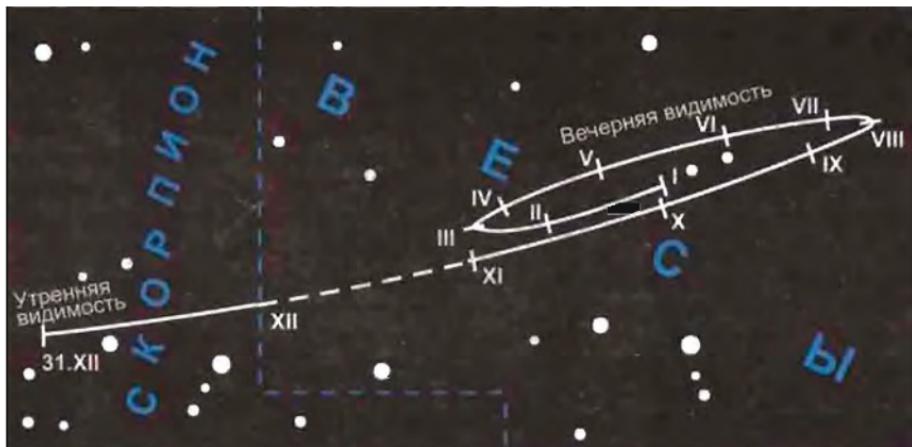


Рис. 10. Видимый путь планеты по небу за год (римские цифры означают первые числа месяца)

ли сложную схему движения планет, часто называемую системой Птолемея (рис. 11). Система мира, по Птолемею, рассматривала движение планет и других небесных тел в системе отсчета, связанной с Землей. В ней принималось, что Луна и планеты, помимо суточного обращения вокруг Земли, одновременно движутся еще по окружностям меньшего радиуса, названным эпикликами. Для того чтобы можно было с достаточной точностью спрогнозировать положение планет на месяцы или годы вперед, для каждой планеты приходилось вводить все больше и больше эпиклик, по мере того как повышалась точность измерений. Схема получилась громоздкой и потеряла наглядность, однако она просуществовала четырнадцать столетий.

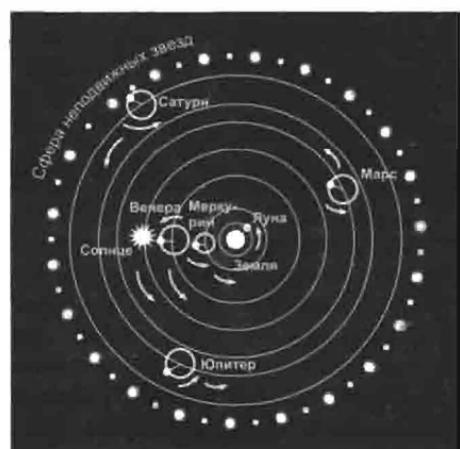


Рис. 11. Геоцентрическая система мира (по Птолемею)

В XVI в. польский ученый Николай Коперник упростил схему движения планет, предложив рассматривать Землю как тело, движущееся вокруг Солнца вместе с планетами и одновременно вращающееся вокруг оси (рис. 12). Коперник первым понял, что сложный характер движения планет связан именно с движущейся Зем-

Птолемей Клавдий (II в. н. э.) — древнегреческий ученый, создатель теории неба — геоцентрической системы мира. Он автор трактата «Великое математическое построение астрономии в XIII книгах» (в переводе на арабский «Альмагест»). «Альмагест» относят к числу важнейших книг, созданных за всю историю науки. В этой книге он определил продолжительность года, дал методы расчета лунных и солнечных затмений, поместил каталог, включающий 1022 звезды, предложил теорию движения Солнца, Луны и планет. В геоцентрической системе мира предполагалось, что все светила движутся вокруг Земли, которая является центром мироздания и имеет шарообразную форму.



«Знаю, что я смертен, знаю, что дни мои сочтены; но когда я в мыслях неустанно и жадно прослеживаю пути светил, тогда я не касаюсь ногами Земли: на пиру Зевса наслаждаюсь амброзией, пищей богов».

К. Птолемей. «Альмагест»

лей. Например, обратное (попятное) движение возникает тогда, когда Земля в своем движении по орбите обгоняет более далекую от Солнца планету.

Кроме того, Коперник считал, что Луна движется вокруг Земли и как спутник вместе с Землей — вокруг Солнца. Опираясь на наблюдения, Коперник пришел к заключению, что все планеты, в том числе и Земля, движутся вокруг Солнца примерно в одной и той же плоскости.

Таким образом, система мира Коперника рассматривала движение планет и других небесных тел в системе отсчета, связанной с Солнцем. Эта система мира получила название гелиоцентрической системы (от греч. *hēlios* — солнце).

* Коперник отчетливо осознавал необычайную важность идеи гелиоцентризма. Недаром так осторожны, лаконичны и тщательно подобраны слова в его сочинениях. Осторожны, но тверды: «Центр Земли не является центром мира, но только центром тяготения и центром лунной орбиты», «Все сферы движутся вокруг Солнца, расположенного как бы в середине всего, так что около

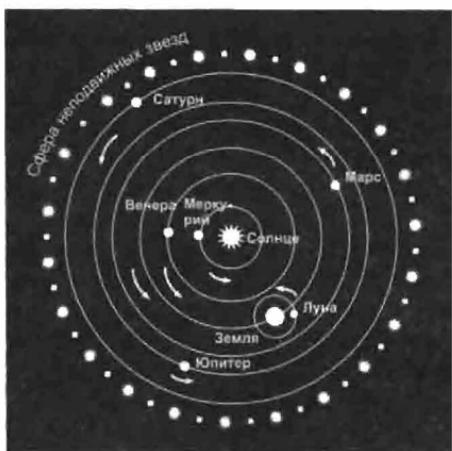


Рис. 12. Гелиоцентрическая система мира (по Копернику)



Коперник Николай (1473 — 1543) — польский ученый. На пьедестале памятника Копернику в Варшаве высечены слова: «Остановивший Солнце, сдвинувший Землю». В главном научном труде «О вращениях небесных сфер. Шесть книг» он предложил гелиоцентрическую систему мира. Нац этой системой мира Коперник работал более 30 лет. В системе мира Коперника Земля, как и другие планеты, обращается по окружности вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси; Луна — естественный спутник Земли. Гелиоцентрическая система Коперника рассматривается как крупнейшее событие в истории не только астрономии, но и естествознания в целом.

Мы с радостью и благодарностью чтим память человека, который больше, чем кто-либо другой на Западе, способствовал освобождению умов от церковных оков и научных догм.

А. Эйнштейн

Солнца находится центр мира», «Именно Земля с ближайшими ее стихиями вся вращается в суточном движении вокруг неизменных своих полюсов», «Все замечаемые нами у Солнца движения не свойственны ему, но принадлежат Земле и нашей сфере, вместе с которой мы вращаемся вокруг Солнца, как и всякая другая планета; таким образом, Земля имеет несколько движений».

В 1551 г. (через восемь лет после смерти ученого) были опубликованы таблицы движения планет, рассчитанные с большой точностью в соответствии с системой Коперника. В 1616 г. книга Коперника «О вращениях небесных сфер» была запрещена католической церковью. Был издан специальный декрет, запрещавший всякую письменную и устную пропаганду учения Коперника. Только в 1835 г. запрет на книгу был отменен.

Значение учения Коперника для развития науки неоценимо: оно произвело настоящую революцию не только в астрономии, но и во всем мировоззрении. До Коперника Земля считалась единственным неподвижным телом во Вселенной, центральной и важнейшей частью мироздания.

В современной физике применяют систему отсчета, связанную как с Солнцем, так и с Землей. При расчете движения тел вблизи поверхности Земли, например искусственных спутников Земли, используют систему отсчета, связанную с Землей. При расчете движения космических ракет, например к Марсу, Венере или Плутону, удобнее применять систему отсчета, связанную с Солнцем. При решении некоторых задач могут оказаться неудобными обе эти системы отсчета. Тогда целесообразно связать систему отсчета с какой-нибудь планетой.

На рисунке 13 схематично изображено движение Земли и Солнца относительно звезд.

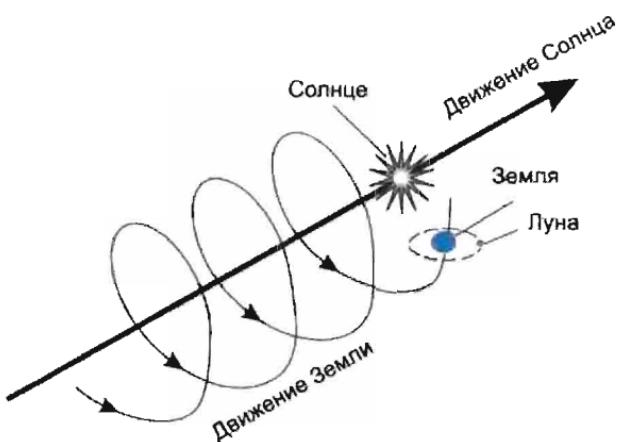


Рис. 13. Движение Земли и Солнца относительно звезд

? 1. Что такое тело отсчета? Приведите примеры тел или группы тел, которые можно считать за тело отсчета. 2. Что понимают под системой отсчета?

● 1. Используя рисунок 9 и учебник «Естествознание, 5», ответьте на вопросы: 1) В каких движениях участвует Земля? 2) Какой угол образует земная ось с плоскостью орбиты? 3) Что такое весеннее и осенне равноденствие? Когда они наблюдаются? 4) Что такое летнее и зимнее солнцестояние? Когда они наблюдаются?

2. Используя рисунок 11, расскажите о геоцентрической системе мира. В какой системе отсчета рассматривалось движение планет и других небесных тел?

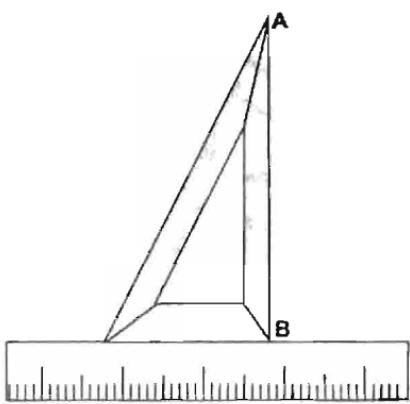
3. Используя рисунок 12, расскажите о гелиоцентрической системе мира. В какой системе отсчета рассматривалось движение планет и других небесных тел?

◆ 1. Возьмите чертежный треугольник, линейку, лист бумаги, карандаш. Расположите линейку и треугольник на листе бумаги так, как показано на рисунке 14, а.

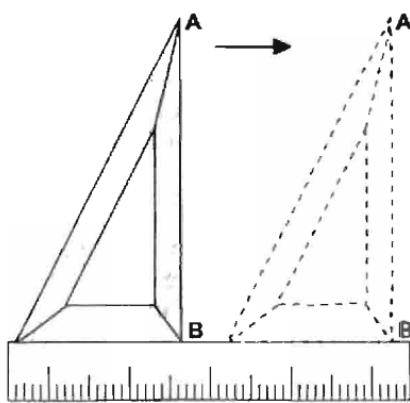
1) Проведите острием карандаша вдоль грани AB неподвижного треугольника. Какова траектория следа, оставленного карандашом на листе бумаги?

2) Проведите острием карандаша вдоль грани AB при одновременном передвижении треугольника по линейке (рис. 14, б). Какова траектория карандаша и следа, оставленного карандашом на листе бумаги?

3) Какой вывод вы можете сделать из эксперимента?



a)



б)

Рис. 14

* 2. Диск, имеющий неподвижную ось вращения, закрепите в вертикальной плоскости в штативе. На другом штативе закрепите линейку и расположите ее горизонтально поверхности стола (рис. 15). Линейка должна касаться диска.

1) Проведите кусочком мела вдоль линейки. Какой след оставит мел на неподвижном диске?

2) Заставьте диск вращаться в вертикальной плоскости. Проведите кусочком мела вдоль линейки. Какой след оставит мел на вращающемся диске?

3) Какой вывод вы можете сделать из анализа результатов эксперимента?

§ 3. ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА

Описать движение какого-либо тела, т.е. получить полную картину его движения,— сложная задача. Ее приходится решать инженерам-конструкторам при создании новых машин, артиллеристам и ракетчикам при расчете движения снарядов и ракет, штурманам, прокладывающим курс самолетам и морским судам. Однако для решения ряда задач не требуется такого полного расчета, и он ведется по упрощенной схеме. Например, железнодорожный путь полностью определяет траекторию движения поезда, шоссе — траекторию движения автомобиля, фарватер реки — траекторию движения теплохода. Диспетчеру, составляющему график движения, не нужно

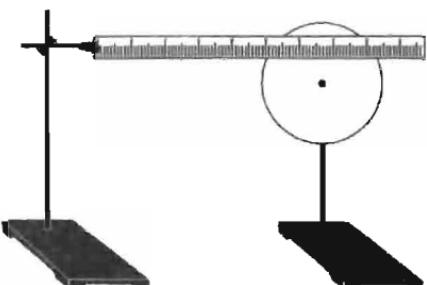


Рис. 15

каждый раз рассчитывать траекторию и направление скорости. Его также не интересует, когда поезд (автомобиль или теплоход) притормаживает, а когда ускоряет ход. Диспетчеру необходимо уметь по положению конечного пункта следования определять расстояние, которое должен пройти поезд (автомобиль или теплоход), а также время его движения. Таким образом, для облегчения изучения движения тела вводится ряд упрощений.

Поступательное движение.

Возможны случаи, когда траектория какой-либо точки тела представляет собой точную копию траектории любой другой его точки, перемещающейся в пространстве. Например, необходимо поднять с пола на подставку ведро с водой (рис. 16). Проследим за движением двух любых точек тела *A* и *B*. Траектории точек показаны на рисунке 16 штриховой линией. Мысленно проведем через эти точки прямую линию. Ведро с водой движется так, что вертикальная прямая, соединяющая точки *A* и *B*, перемещаясь, остается параллельной самой себе. При этом сохраняется расстояние между точками.

Движение тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается, оставаясь параллельной своему начальному направлению, называется поступательным движением.

Поступательно движутся кузов автомашины на прямолинейном участке пути, кабина колеса обозрения, педали велосипеда относительно дороги, магнитная стрелка компаса относительно стола при плавном перемещении корпуса по этому столу.

При поступательном движении нет необходимости описывать движение каждой точки тела, достаточно рассмотреть движение какой-либо одной точки.

Материальная точка. Тело, размерами и формой которого в данных условиях движения можно пренебречь, одновременно предполагая, что вся масса тела сосредоточена в данной точке, называется материальной точкой.

Материальных точек не существует в природе — это абстрактное понятие, введение которого упрощает изучение движения макроскопических тел. Это понятие применимо, в частности, когда тело движется поступательно.

Вдумаемся в данное определение: «Тело, размерами и формой которого в данных условиях движения можно пренебречь...» Это не случайно: все зависит от размеров самих тел и расстояний между ними. Обоснуем наше утверждение примерами.



Рис. 16. Поступательное движение ведра с водой

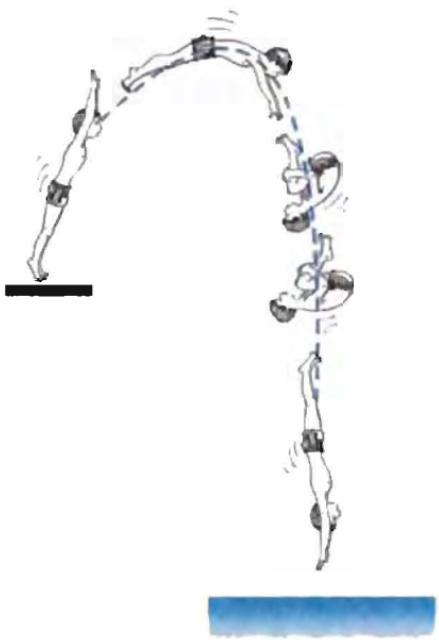


Рис. 17

Пример 1. Вы наблюдаете с трибуны бассейна за соревнованиями прыгунов с 10-метрового трамплина (рис. 17). Тело спортсмена, делающего сальто в воздухе, нельзя заменить точкой, поскольку размеры тела лишь в несколько раз меньше расстояния, преодолеваемого спортсменом. В этом случае важны и размеры, и форма тела.

Пример 2. Пассажирский самолет Ил-86 находится на взлетной полосе. Габариты самолета: длина 56,1 м, высота 15,5 м, размах крыла 48,2 м, масса 210 000 кг. Можно ли считать самолет материальной точкой? Конечно, нет, поскольку в этом случае важны и его размеры, и его форма. Когда же самолет находится

на высоте 10 км от поверхности Земли, то размерами и формой можно пренебречь по сравнению с расстоянием его от поверхности Земли. В этом случае самолет можно считать материальной точкой.

Пример 3. Российская космическая орбитальная станция «Мир» проработала на орбите 15 лет. Данные о станции (без модулей): длина 14 м, диаметр 4,2 м, масса 20 900 кг. Высота полета станции над Землей составляла 200–300 км. Во время движения орбитальной станции вокруг Земли размерами и формой ее по сравнению с расстоянием до поверхности Земли можно было пренебречь, т.е. считать орбитальную станцию материальной точкой.

? Можно ли считать орбитальную станцию материальной точкой, если ракета-носитель находится на старте?

Пример 4. Планета Сатурн находится от Солнца на расстоянии 1426 млн км, диаметр планеты 120 000 км, т.е. примерно в 11 883 раза меньше расстояния до Солнца. Поэтому Сатурн можно считать материальной точкой, которая движется вокруг Солнца. Масса планеты Сатурн $5,7 \cdot 10^{26}$ кг.

Вы, вероятно, обратили внимание на то, что во всех случаях учитывались размеры тела по сравнению с расстояниями до других тел, а также его форма. При этом важно иметь в виду, что, считая тело материальной точкой, нельзя пренебрегать его мас-

Материальная точка

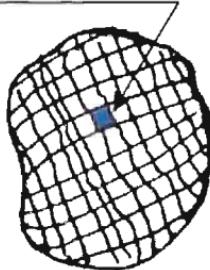


Рис. 18

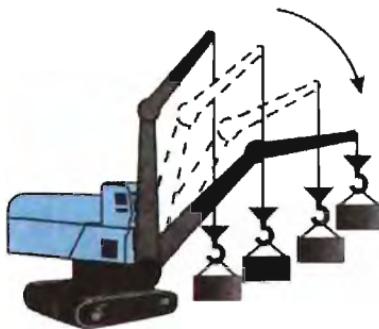


Рис. 19

сой. Иначе будем считать, что *материальная точка не имеет геометрических размеров, но обладает массой*.

Как вы убедились, тело не всегда можно считать материальной точкой. Как же быть в этих случаях? Выход есть. Можно мысленно разделить тело на столь малые участки, что каждый из них допустимо считать материальной точкой (рис. 18). В механике любое тело можно рассматривать как совокупность большого числа материальных точек.

? 1. На рисунке 19 воспроизведено несколько положений работающего подъемного крана. Можно ли считать поступательным движение стрелы? ковша? 2. В каких из приведенных ниже случаев изучаемое тело можно принять за материальную точку? 1) Расчет давления трактора на грунт. 2) Определение высоты полета ракеты. 3) Определение объема стального шарика с помощью измерительного цилиндра (мензурки). 4) Следение за движением космического корабля из Центра управления полетом на Земле. 5) Наблюдение космонавтом, который находится на орбитальной станции, за движением грузового космического корабля, стыкующегося с этой станцией.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА

Для простоты определения положения протяженного тела будем рассматривать поступательное движение тела, т. е. будем говорить о положении какой-либо точки тела.

Для определения положения тела (материальной точки) относительно выбранной системы отсчета можно воспользоваться одним из трех способов: *координатным*, *векторным* или *траекторным*.

Координатный способ определения положения тела (материальной точки). Пространство, в котором мы живем, трехмерно. Поэтому, чтобы указать положение какой-либо точки *A* в пространстве, надо найти три числа, выраждающие положение точки относительно выбранной системы отсчета.

Обозначим длину OX через x , OY через y и OZ через z (рис. 20, а). Эти три числа x , y , z называются координатами точки A .

Когда тело движется относительно выбранной системы отсчета, то при координатном способе можно определить положение тела в любой момент времени тремя координатами x , y и z . Обычно указывают координаты тела в начальный момент времени ($t = 0$): x_0 , y_0 , z_0 — и координаты тела в момент времени t : x , y , z (рис. 20, б).

За время t координата x изменилась на $x - x_0$, координата y — на $y - y_0$, координата z — на $z - z_0$. Величины $x - x_0$, $y - y_0$, $z - z_0$ представляют собой изменения координат — это величины, равные разностям их конечных и начальных значений. Изменения величины будем обозначать буквой греческого алфавита Δ (читается «дельта»): $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$, $\Delta z = z - z_0$ (рис. 20, в).

Часто приходится изучать движение тела по некоторой поверхности (поверхности стола, пола, воды и т. д.). По поверхности земли движутся все средства наземного транспорта. В этом случае в прямоугольной системе координат достаточно указать две оси координат, например OX и OY (рис. 21). Положение тела (точки) на плоскости задается двумя координатами x и y . Например, координаты точки A такие: $x = 4$, $y = 4$ (рис. 21, а); $x = -2$, $y = 4$ (рис. 21, б); $x = 2$, $y = -2$ (рис. 21, в); $x = -2$, $y = -3$ (рис. 21, г).

Если тело движется вдоль некоторой прямой линии, то его положение определяется одной координатой — расстоянием тела от выбранного на этой линии тела отсчета (начала координат): x (рис. 22, а, б), y (рис. 22, в, г).

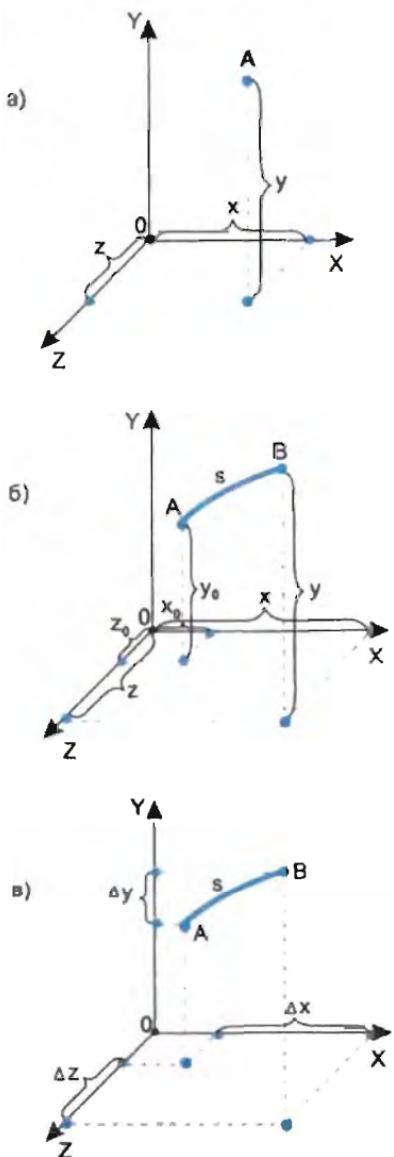


Рис. 20. Координатный способ определения положения тела в пространстве

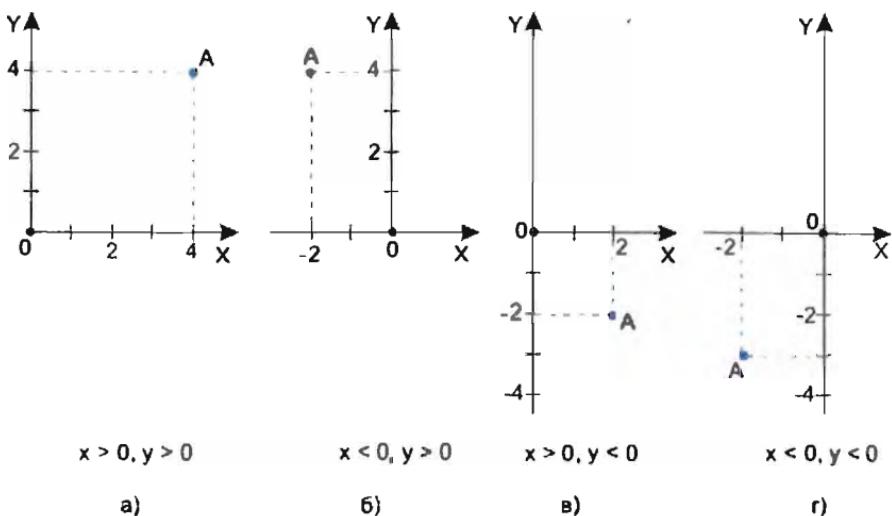


Рис. 21. Координатный способ определения положения тела на плоскости

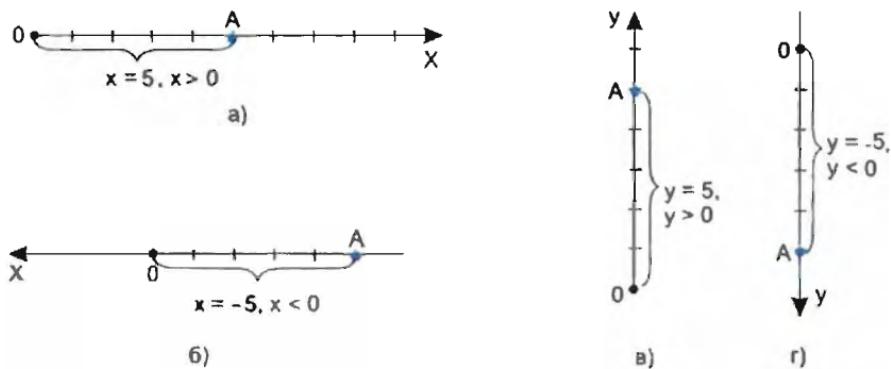


Рис. 22. Координатный способ определения положения тела на прямой линии

Таким образом, определить положение тела (материальной точки) — это значит определить его (ее) координаты в любой момент времени. Положение тела на прямой линии определяется одной координатой x (y или z), на плоскости — двумя координатами x , y (x , z или y , z), в пространстве — тремя координатами x , y , z . Знак координаты определяется указанием положительного направления координатной оси OX , OY и (или) OZ .

Векторный способ определения положения тела (материальной точки). При векторном способе положение тела в любой момент времени определяется вектором, проведенным из начала координат в точку, где находится тело. Этот вектор получил название *радиус-вектор* и обозначается так: \vec{r} .



Рис. 23. Векторный способ определения положения тела

траектории (рис. 24). Положение движущегося тела определяется расстоянием s , пройденным вдоль траектории и взятым с соответствующим знаком. Особенно удобен этот способ при изучении прямолинейного движения:

В курсе 8 класса будем пользоваться *координатным и траекторным способами определения положения тела*.

Проекции вектора на координатные оси. Проекциями вектора \vec{a} на координатные оси OX и OY называют длины отрезков a_x и a_y (рис. 25), ограниченные проекциями начала и конца вектора на соответствующую координатную ось, взятые со знаком «плюс» или «минус». *Проекции вектора – величины скалярные.*

Проекция вектора на выбранную координатную ось считается положительной (рис. 25, а, б, г), если от проекции начала вектора к проекции его конца надо «идти» по направлению, которое совпадает с выбранным нами положительным направлением координатной оси.

Проекция вектора на выбранную координатную ось считается отрицательной (рис. 25, б, в, д), если от проекции начала вектора к проекции его конца надо «идти» по направлению, которое противоположно выбранному нами положительному направлению координатной оси.

Если вектор перпендикулярен координатной оси, то при любом направлении вектора его проекция на координатную ось равна нулю (рис. 25, г, д).

Проекции вектора перемещения и координаты тела (материальной точки). Связь между проекциями векто-



Рис. 24. Траекторный способ определения положения тела: O – точка отсчета; A – начальное положение тела (при $t = 0$); B – положение тела в момент времени t ; s – пройденный путь

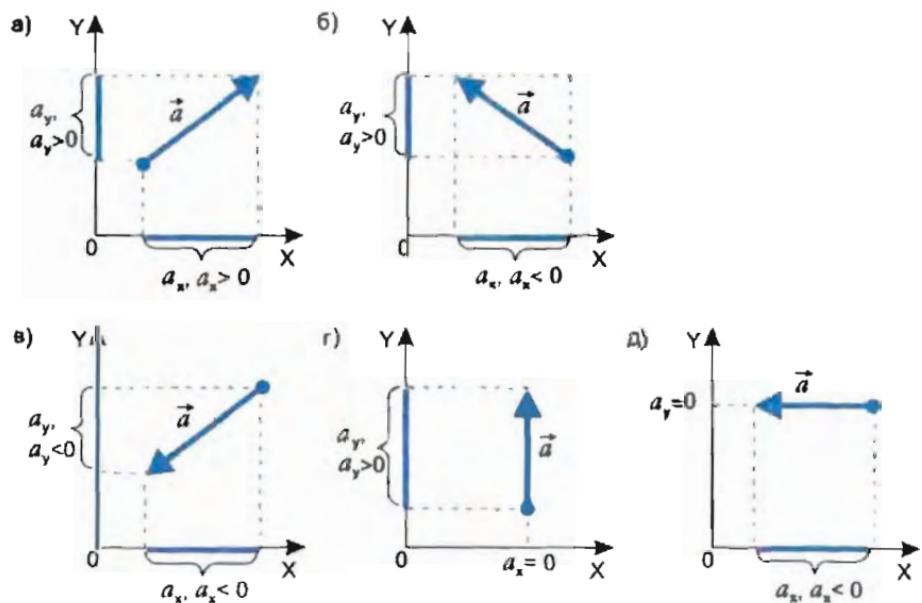


Рис. 25. Проекция вектора на координатные оси

ра перемещения с изменением координаты тела поясним на примере движения тела на плоскости.

Тело совершило перемещение \vec{s} (рис. 26). Найдем проекции вектора \vec{s} на координатные оси OX и OY : s_x и s_y (рис. 26, а, б).

Числовое значение проекции вектора перемещения \vec{s} на координатную ось равно изменению координаты тела:

(рис. 26, а)

$$\begin{aligned}s_x &= x - x_0, \\ s_y &= y - y_0.\end{aligned}$$

(рис. 26, б)

$$\begin{aligned}s_x &= x_0 - x \rightarrow s_x = x - x_0, \\ s_y &= y_0 - y \rightarrow s_y = y - y_0.\end{aligned}$$

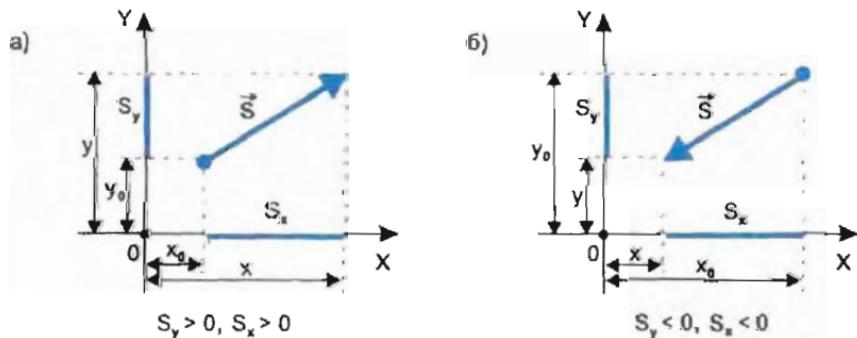


Рис. 26. Проекция вектора перемещения на координатные оси

Отсюда следует, что, зная вектор перемещения (а значит, и его проекции на координатные оси), можно определить координаты тела:

$$x = x_0 + s_x,$$

$$y = y_0 + s_y,$$

где x_0 и y_0 — начальные координаты тела (при $t = 0$); x и y — координаты тела в любой момент времени t .

● 1. На рисунке 27, а, б, в, г показаны положения тел (материальных точек) на плоскости. Запишите значения координат тела для каждого случая.

2. На рисунке 28 показаны перемещения пяти тел (материальных точек). Запишите значения проекций векторов перемещения на координатные оси OX и OY для каждого из тел. В каком случае проекция равна нулю?

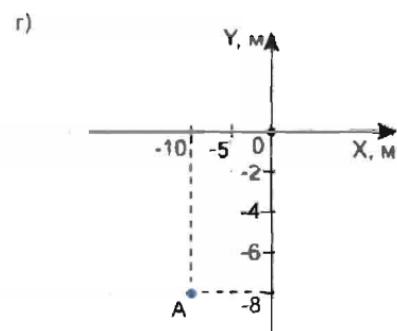
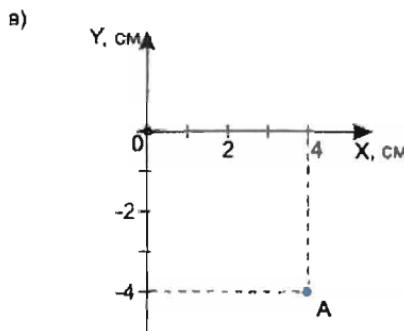
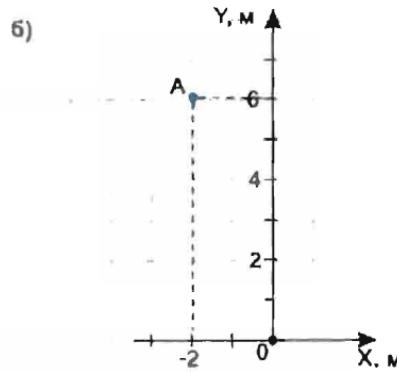
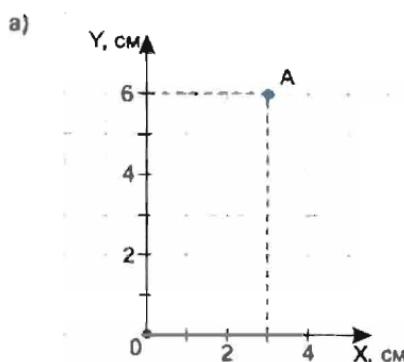


Рис. 27

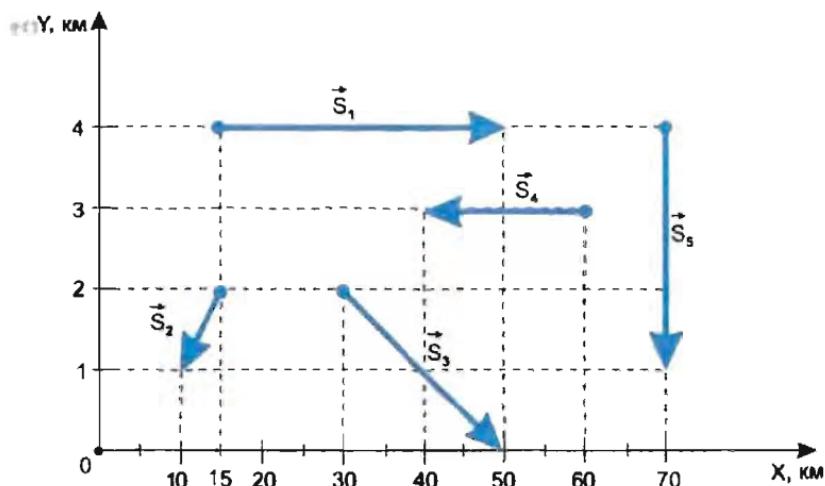


Рис. 28

§ 5. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ

Если какая-либо материальная точка находится на поверхности шара (части пространства, ограниченного сферой) или движется по ней, то для описания положения точки достаточно знать только две координаты. Координаты, характеризующие положение точки на шаре (сфере), могут быть угловыми и изменяться в градусах или их долях, а не в метрах или сантиметрах.

Географические координаты. Из курса естествознания 5 класса вы знаете, что Землю мы считаем шарообразной; ее модель — глобус. Положение любой точки на земной поверхности определяется географическими координатами: широтой и долготой (рис. 29).

Географическая широта (ϕ) — угол между отвесной линией в данной точке и плоскостью земного экватора. Отвесная линия — линия, совпадающая с направлением действия силы тяжести в месте наблюдения. Географическая широта отсчитывается от 0 до 90° в обе стороны от экватора. Широта меняется от 0 до 90° в северном полушарии, от -90 до 0° в южном полушарии.

Географическая долгота (λ) — угол между плоскостью начального (нулевого) меридиана и плоскостью, проходящей через данную точку. Начальный меридиан выбран условно и проходит через Гринвичскую обсерваторию. Долгота меняется от 0 до 360° ; причем долгота от 0 до 180° к востоку от начального меридиана называется восточной, к западу — западной.

Небесные координаты. Для определения положения небесного тела на небе необходимо знать расстояние до него. Все небесные объекты так далеки, что они представляются нам распо-



Рис. 29. Географические координаты точки M : ϕ — географическая широта — угол MCN ; λ — географическая долгота — угол OCN



Рис. 30. Основные точки, линии и плоскости небесной сферы

ложеными на сфере, в центре которой мы находимся. Такая условная сфера получила название *небесной сферы* — *воображаемой сферы произвольного радиуса*, центр которой находится в точке наблюдения.

В прошлые века считалось, что небесная сфера существует реально, отсюда и появился этот термин. Так, в Библии (книга «Бытие ...») буквально говорится о «*твърди небесной*». Понятие небесной сферы используется и сейчас, но уже как математическая модель, делающая удобным построение систем небесных координат.

На рисунке 30 изображена небесная сфера. Рассмотрим основные точки, линии и плоскости на небесной сфере. P_N — Северный полюс мира, P_S — Южный полюс мира. Ось видимого вращения небесной сферы, соединяющая оба полюса мира (P_N и P_S) и проходящая через наблюдателя (C), называют *осью мира*. Ось мира для любого наблюдателя всегда будет параллельна оси вращения Земли (рис. 31). На горизонте под Северным полюсом мира лежит *точка севера* N (см. рис. 30, 31), диаметрально противоположная ей точка S — *точка юга*. Линия NCS называется *полуденной линией*, так как вдоль нее на горизонтальной плоскости в полдень падает тень от вертикально поставленного стержня. Отвесная линия пересекает сферу в двух точках: в точке *зенита* Z (над головой наблюдателя) и в точке *надира* Z' (в диаметрально противоположной точке). Прямая ZCZ' , проходящая через наблюдателя, — *отвесная линия*. Плоскость $NESW$, перпендикулярная отвесной линии, является *плоскостью горизонта*. Плоскость горизонта касается поверхности земного шара в точке, где расположен

наблюдатель (точка С на рис. 31). Плоскость горизонта делит поверхность небесной сферы на две полусфера: видимую, все точки которой находятся над горизонтом, и невидимую, точки которой лежат под горизонтом. Плоскость $QWQE$, проходящая через центр сферы (точку С) перпендикулярно оси мира, образует *плоскость небесного экватора*. Плоскость небесного экватора параллельна плоскости земного экватора. Небесный экватор делит поверхность небесной сферы на два полушария: *северное* с вершиной в Северном полюсе мира и *южное* с вершиной в Южном полюсе мира.

Для составления звездных каталогов и звездных карт применяют *экваториальную систему координат*. Система координат получила такое название потому, что небесный экватор служит той плоскостью, от которой производятся отсчеты координат. В экваториальной системе координат используются две координаты: *склонение* и *прямое восхождение* (рис. 32).

Склонением (δ) называется угловое расстояние светила от небесного экватора (δ — буква греческого алфавита, читается «дельта»). Оно меняется в пределах $\pm 90^\circ$ и считается положительным к северу от небесного экватора и отрицательным к югу. Склонение аналогично географической широте.

Прямое восхождение (α) светила измеряется углом между плоскостями больших кругов, один из которых проходит через полюсы мира и данное светило M , а другой — через полюсы мира и точку весеннего равноденствия (γ), лежащую на экваторе (γ — буква греческого алфавита, читается «гамма»). Точку γ называли точкой весеннего равноденствия потому, что в ней Солнце бывает (на небесной сфере) весной 20–21 марта, когда день равен ночи.



Рис. 31. Соотношение между линиями и плоскостями на небесной сфере и на земном шаре

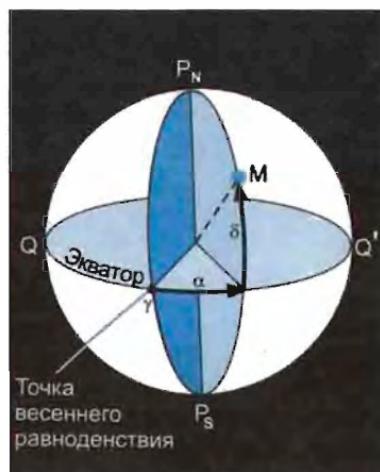


Рис. 32. Экваториальные координаты: δ — склонение; α — прямое восхождение

Прямое восхождение отсчитывается по дуге небесного экватора от точки весеннего равноденствия против хода часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса. Оно изменяется в пределах от 0 до 360° и называется прямым восхождением потому, что звезды, расположенные на небесном экваторе, восходят (и заходят) в порядке возрастания их прямого восхождения. Прямое восхождение аналогично географической долготе.

На координатной сетке звездных карт, атласов и глобусов прямое восхождение обозначается в единицах времени, так как это явление связано с вращением Земли. За 24 ч Земля (а нам кажется, что звезды) совершает один оборот — 360° . Следовательно, 360° соответствуют 24 ч, тогда 15° — 1 ч, 1° — 4 мин, $15'$ — 1 мин, $15''$ — 1 с.

* **Определение географической широты места по наблюдению высоты Полярной звезды.** Как вы знаете из курса естествознания, Земля вращается с запада на восток вокруг воображаемой оси, проходящей через ее Северный и Южный географические полюсы. Находясь на Земле, мы не замечаем, что участвуем в этом вращении, а потому нам кажется, что в противоположном направлении, т. е. с востока на запад, вращается весь небосвод вместе с Солнцем, Луной, планетами и звездами также вокруг воображаемой оси, параллельной оси вращения Земли. Северный ее конец направлен к Северному полюсу мира P_N , а южный — к Южному полюсу мира P_S . Это две воображаемые точки на небе, через которые проходит ось кажущегося суточного движения всех светил.

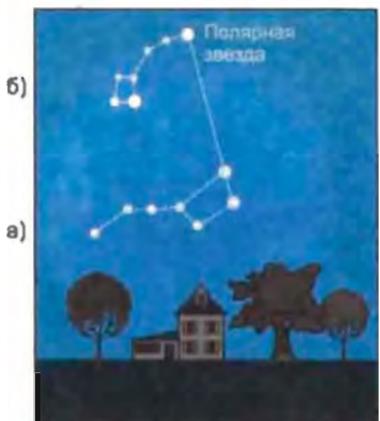


Рис. 33. Схема взаимного расположения созвездий: а) Б. Медведицы; б) М. Медведицы

Вблизи Северного полюса мира на расстоянии от него $0^\circ 44'$ (читается «ноль градусов сорок четыре минуты») находится яркая звезда, называемая Полярной звездой (или просто Полярной). Полярная звезда располагается в ручке ковша созвездия Малой Медведицы (рис. 33). Полярная звезда описывает вокруг Северного полюса мира малую окружность диаметром около полутора градусов. При определении географической широты места ϕ по высоте Полярной звезды с точностью $\pm 1^\circ$ можно считать, что Полярная звезда совпадает с Полюсом мира, а при более точных измерениях необходимо учитывать расстояние и направление ее удаления от Полюса мира.

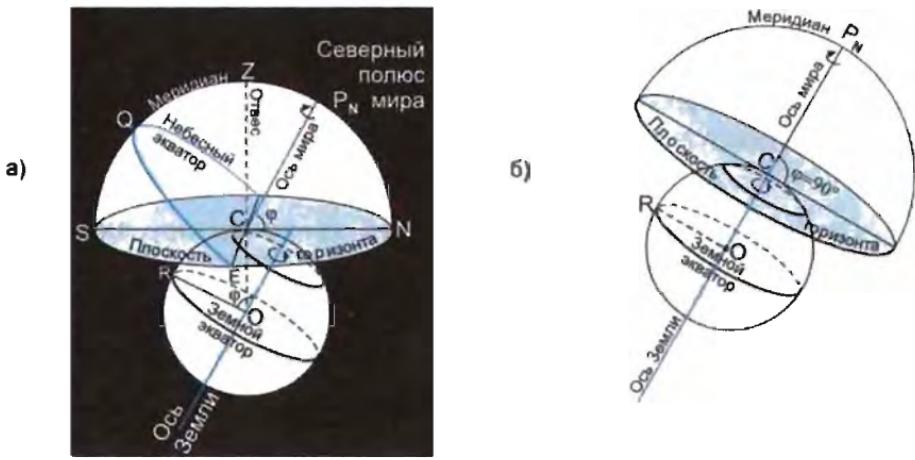


Рис. 34. Видимое положение Северного полюса мира (P_N) на небе относительно горизонта на разных широтах: а) на широте ϕ ; б) на Северном полюсе Земли

На рисунке 34, а показана географическая широта места ϕ для наблюдателя, находящегося в точке C : $\phi = \angle COR$. Угловое расстояние светила от горизонта называется его высотой. Высота Северного полюса мира P_N над горизонтом $h_{P_N} = \angle P_NCN$. Эти два угла ($\angle P_NCN = \angle COR$) равны как углы со взаимно перпендикулярными сторонами: $OC \perp CN$, $OR \perp CP_N$. Равенство этих углов дает простой способ определения географической широты местности ϕ : угловое расстояние Поляса мира от горизонта равно географической широте местности. Чтобы определить географическую широту местности, достаточно измерить высоту Поляса мира над горизонтом, так как $\phi = h_{P_N}$. Это соотношение является следствием теоремы о высоте Поляса мира над горизонтом: высота Северного полюса мира над горизонтом равна его географической широте места. В такой формулировке теорема справедлива и для южного полушария, если учесть, что там широта считается отрицательной, а Северный полюс мира находится под горизонтом (в этом случае высота тоже считается отрицательной).

Для наблюдателя, находящегося на Северном полюсе Земли (рис. 34, б), Северный полюс мира и близкая к нему Полярная звезда находятся в зените Z , т. е. на угловом расстоянии 90° от горизонта. Следовательно, и на Северном полюсе высота Северного полюса мира (h_{P_N}) равна широте ϕ ($\phi = 90^\circ$). Для наблюдателя, находящегося на земном экваторе, оба полюса мира находятся на горизонте (их высота равна нулю) и также численно совпадают с широтой места ϕ ($\phi = 0$).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА I

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

(выполняется во внеурочное время ясным вечером двумя наблюдателями)

Приборы и материалы: школьный транспортир, линейка, карандаш, отвес, два визира (один — игла, гвоздь или шуруп, другой в виде диафрагмы с круглым отверстием), шило, вертикальная стойка или шест (можно использовать дверь, открывающуюся в направлении на север), планшет (или лист картона).

Визир — устройство, с помощью которого инструмент наводят на какую-либо точку.

◆ 1. Определите цену деления и инструментальную погрешность школьного транспортира.

2. Укрепите визиры 1 и 2 на планшете так, как показано на рисунке 35, а. При визировании луч зрения наблюдателя должен проходить через острое визира 1 и центр круглого отверстия визира 2.

3. Начертите с помощью линейки на планшете линию 1—2, соединяющую основания обоих визиров (рис. 35, б).

4. На свободном конце нити отвеса сделайте петельку и накиньте ее на острый конец шила. Примерно в середине отрезка 1—2 планшета найдите точку и воткните в нее шило с отвесом (см. рис. 35, в).

5. Пришпильте планшет с шилом и отвесом к вертикальной стойке, плоскость которой ориентирована на север. Планшет должен поворачиваться вокруг шила в вертикальной плоскости.

6. Поворачивая планшет вокруг шила, наведите свой прибор на Полярную звезду так, чтобы она была видна одновременно в центре круглого отверстия визира 2 и на острье визира 1 (рис. 35, в).

7. Одновременно, не меняя положение планшета, наведенного на Полярную звезду, с помощью линейки начертите на нем линию вдоль висящего отвеса.

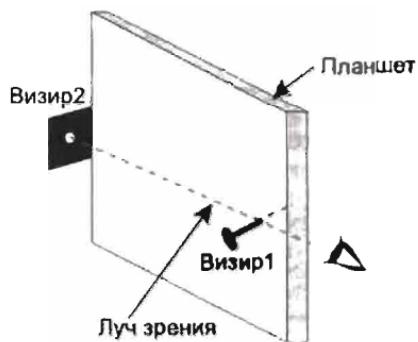
8. Уберите с планшета шило и отвес. Положите планшет на стол и измерьте транспортиром острый угол α между обеими начертанными линиями (см. рис. 35, в).

9. Определите широту своего места, обозначенную на рисунке 35, в углом β , по формуле:

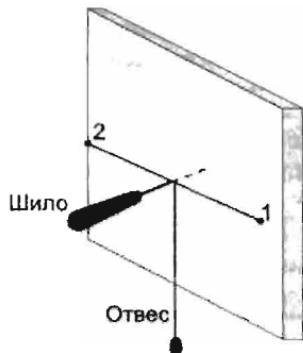
$$h_P = \phi = \beta = 90^\circ - \alpha .$$

10. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу 2.

а)



б)



в)



Рис. 35

Таблица 2

| Измерение высоты Полярной звезды | | | |
|----------------------------------|---------|-----------|-------|
| α | β | φ | h_P |
| | | | |
| Высота Полярной звезды: | | | |

? 1. Что понимают под небесной сферой? 2. Назовите основные точки, линии и плоскости небесной сферы. 3. Какие наблюдения убеждают нас в суточном вращении небесной сферы?

● 1. Используя рисунок 36, определите географические координаты:

- 1) Москвы: широта $\phi =$ _____ ; долгота $\lambda =$ _____.
- 2) Иркутска: широта $\phi =$ _____ ; долгота $\lambda =$ _____.
- 3) Лондона: широта $\phi =$ _____ ; долгота $\lambda =$ _____.
- 4) Точки M: широта $\phi =$ _____ ; долгота $\lambda =$ _____.

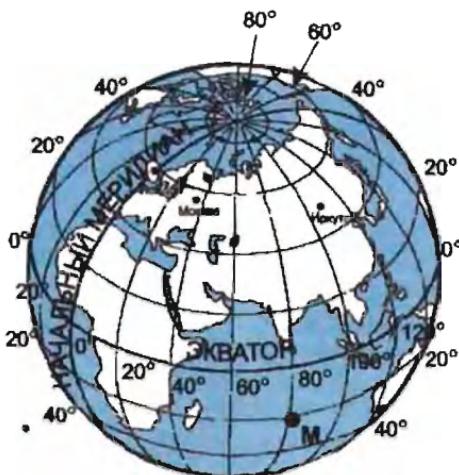


Рис. 36. Определение географической широты и долготы

2. В таблице 3 приведены экваториальные координаты некоторых звезд, видимых в России. Какие из звезд расположены к северу от небесного экватора, а какие – к югу от небесного экватора?

Таблица 3

| Наименование звезды | α | δ |
|---------------------|---------------------------------------------|----------|
| Альдебаран | 04 ⁴³⁴ ^м (4 ч 34 мин) | + 16°28' |
| Альтаир | 19 ⁴⁴⁹ ^м | + 08°48' |
| Антарес | 16 ⁴²⁸ ^м | - 26°23' |
| Бетельгейзе | 05 ⁴⁵³ ^м | + 07°24' |

| Наименование звезды | α | δ |
|---------------------|---------------------------------|----------|
| Вега | 18 ⁴ 36 ^M | + 38°47' |
| Капелла | 05 ⁴ 14 ^M | + 45°58' |
| Поллукс | 07 ⁴ 43 ^M | + 28°05' |
| Полярная | 02 ⁴ 07 ^M | + 89°09' |
| Ригель | 05 ⁴ 13 ^M | - 08°14' |
| Сириус | 06 ⁴ 44 ^M | - 16°41' |
| Спика | 13 ⁴ 23 ^M | - 11°02' |

§ 6. ВИДИМЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД, СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Текли дугою звезды —
и до нас!
Сияли людям зори —
и до нас!

О. Хайям

Суточное движение небесных тел. В средних широтах Солнце всегда восходит в восточной стороне неба. Оно появляется из-за удаленных предметов или неровностей земного рельефа, затем постепенно поднимается над горизонтом и, наконец, в полдень достигает наивысшего положения на небе. Наблюдатель, находящийся в северном полушарии Земли, при этом видит Солнце на юге, а находящийся в южном полушарии — на севере. После полудня Солнце начинает опускаться, приближаясь к горизонту, и заходит в западной части неба. Дневной путь Солнца на небе **симметричен относительно направления север — юг**.

Подобное движение по небу в течение суток можно заметить и у других небесных тел: Луны, звезд и планет. Создается впечатление, что небосвод вращается как целое вокруг оси мира. При наблюдении ясной ночью звезд в северной части неба можно заметить, что они описывают концентрические круги с центром в некоторой точке, близкой к Полярной звезде (α М. Медведицы). Как вы знаете, эта точка называется Се-



Рис. 37. Фотография суточного вращения звездного неба

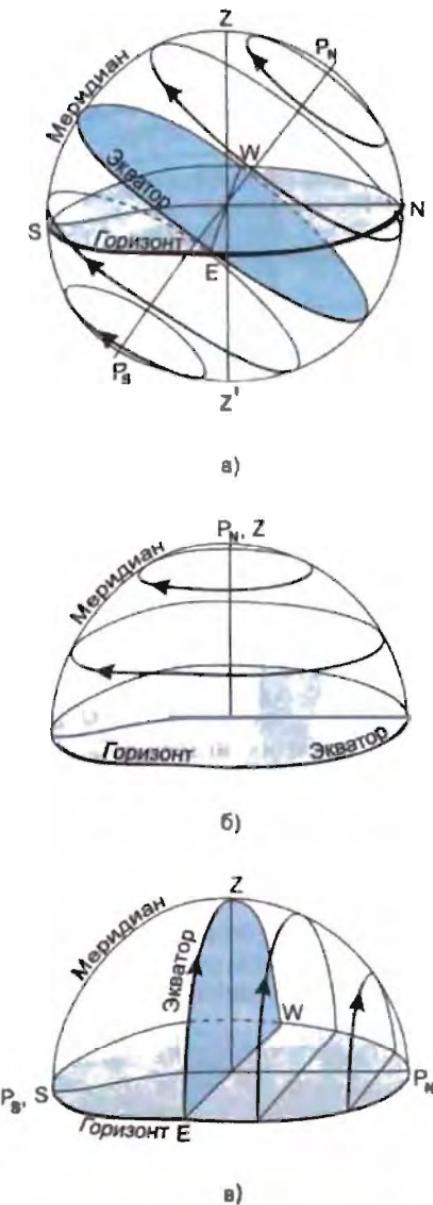


Рис. 38. Суточные пути звезд: а) на средних широтах; б) на Северном полюсе Земли; в) на экваторе

называется *кульминацией*, причем ближайшее к зениту — *верхней кульминацией*, а более удаленное — *нижней кульминацией*. В верхней кульминации звезда имеет наибольшую высоту, а в нижней —

верным полюсом мира. На рисунке 37 приведена фотография звездного неба вблизи Северного полюса мира, полученная неподвижной камерой, затвор которой был открыт на несколько часов. Видимые пути звезд изобразились дугами окружностей.

Кажущееся вращение небесного свода вокруг оси мира — следствие действительного вращения Земли вокруг своей оси, происходящего в противоположную сторону, т. е. с запада на восток (см. рис. 31). Поэтому ось мира параллельна оси вращения Земли.

Причина видимых движений Солнца и звезд по небу в том, что мы рассматриваем небесные объекты в системе отсчета, связанной с вращающейся Землей.

Видимое движение небесных тел, происходящее из-за вращения Земли вокруг оси, называется *суточным движением*, в период вращения Земли вокруг оси — *сутками*.

Зависимость суточного движения звезд от положения наблюдателя, находящегося на Земле. Суточные пути звезд на небесной сфере — окружности, плоскости которых параллельны небесному экватору. Каждая из этих окружностей в двух точках пересекает небесный меридиан (рис. 38, а).

Явление пересечения звездой небесного меридиана называется *кульминацией*, причем ближайшее к зениту — *верхней кульминацией*, а более удаленное — *нижней кульминацией*. В верхней кульминации звезда имеет наибольшую высоту, а в нижней —

наименьшую. Момент верхней кульминации центра Солнца называется истинным полуднем, а нижней — истинной полночью.

Высота звезды в кульминации зависит от географической широты места наблюдения. Если наблюдатель находится на одном из географических полюсов Земли, то для него ось мира совпадает с отвесной линией. Высота Северного полюса мира над горизонтом в этом случае $h_{PN} = \pm 90^\circ$. Наблюдателю кажется, что небо вращается вокруг вертикальной оси, а суточные пути звезд параллельны горизонту, с которым совпадает плоскость небесного экватора (рис. 38, б). Поэтому для наблюдателя, находящегося на полюсе Земли, высота любого светила над горизонтом в течение суток не меняется. Когда наблюдатель находится на земном экваторе, то ось мира станет перпендикулярной отвесной линии и будет находиться в плоскости горизонта (рис. 38, в). В этом случае высота Северного полюса мира над горизонтом $h_{PN} = 0$. Полюсы мира окажутся при этом в точках севера N и юга S , плоскости небесного экватора и суточных путей звезд станут перпендикулярными плоскости горизонта. Поэтому на экваторе могут наблюдаваться все звезды северного и южного полушарий неба.

Таким образом, наблюдатели, находящиеся на полюсе Земли и на экваторе, видят движение звезд совершенно по-разному: на полюсе всегда над горизонтом находятся звезды соответствующего полушария неба, они являются *незаходящими*; на экваторе в каждый момент времени над горизонтом находится половина обоих полушарий неба, **все звезды в течение суток восходят и заходят**.

Когда наблюдатель находится в южном полушарии Земли, Северный полюс мира для него невидим. Над горизонтом будет Южный полюс мира, который тем ближе к зениту, чем наблюдатель ближе к Южному полюсу Земли. Вблизи Южного полюса мира нет яркой звезды, но на расстоянии около 10° имеется созвездие Южного Креста.

Для всех остальных мест на Земле, где географическая широта удовлетворяет условию

$$0 < |\phi| < 90^\circ,$$

имеются три категории звезд: 1) *незаходящие*, у которых высота в нижней кульминации $h > 0$ (они всегда находятся выше горизонта); 2) *восходящие и заходящие*; 3) *невосходящие*, никогда не наблюдаемые в данном месте (высота в верхней кульминации $h < 0$). К какой категории относится данная звезда, зависит лишь от склонения и широты места наблюдения.

-
- Определите, какие звезды (см. табл. 3 § 5) являются невосходящими и незаходящими для вашей местности.
-

Годичное движение Солнца. При наблюдении звездного неба в один и тот же час в течение многих ночей можно заметить, что вид его меняется: одни звезды уходят за горизонт, другие появляются. Создается впечатление, что небо медленно поворачивается в ту же сторону, в которую происходит его сугочное вращение. Поэтому каждую ночь любая звезда кульминирует раньше, чем в предыдущую ночь, примерно на 4 мин (точнее, на 3 мин 56 с).

По этой же причине, если по точным часам измерять промежутки времени между верхними кульминациями звезд и Солнца, то можно убедиться в том, что промежутки между кульминациями звезд на **четыре минуты короче**, чем промежутки между кульминациями Солнца. Объясняется это тем, что за время одного оборота вокруг оси (сутки) Земля проходит примерно $1/365$ -ю часть своего пути вокруг Солнца. Нам же кажется, что Солнце сдвигается на фоне звезд к востоку — в сторону, противоположную суточному вращению неба. Этот сдвиг составляет около 1° . Чтобы повернуться на такой угол, небесной сфере нужно еще 4 мин, на которые и «запаздывает» кульминация Солнца. В результате движения Земли по орбите Солнце за год описывает на небе относительно звезд большой круг, называемый **экспликтой** (рис. 39). Эксплитика наклонена к плоскости небесного экватора под углом $23,5^\circ$. Плоскость эксплитики — это **плоскость, в которой лежит путь Земли вокруг Солнца (ее орбиты)**.

Эксплитика пересекает небесный экватор в двух точках: в точке **весеннего равноденствия** (точке весны) γ , в которой Солнце переходит из южного полушария неба в северное, и в противоположной ей точке **осеннего равноденствия** (точке осени)

γ' . Эксплитика (видимое годичное движение Солнца среди звезд) проходит через 12 созвездий, называемых **зодиакальными** (от греч. *zōdiakos kyklos* — звериный круг), а их совокупность называется **поясом зодиака**. В него входят следующие созвездия: Рыбы, Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей (рис. 40). В каждом зодиакальном созвездии Солнце находится в среднем в течение одного месяца.

В точке весны (созвездие Рыбы) Солнце бывает 20–21 марта, в точке осени (созвездие Девы) — около 23 сентября. Наиболее далекие



Рис. 39. Взаимное расположение эксплитики и небесного экватора

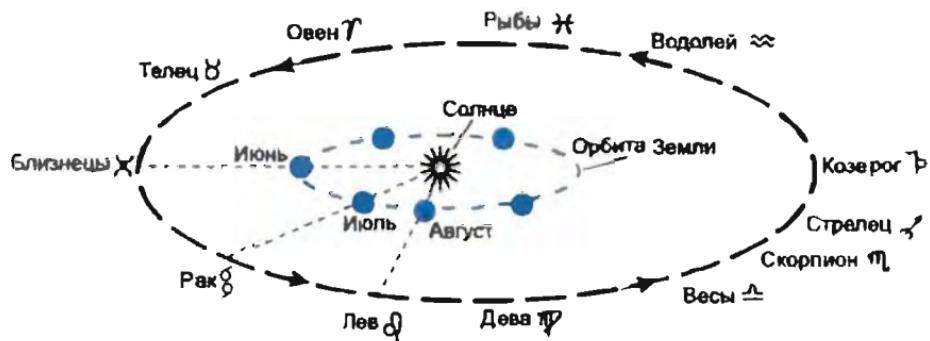


Рис. 40. Движение Земли вокруг Солнца и кажущееся годичное движение Солнца на фоне зодиакальных созвездий

от небесного экватора точки Солнце проходит 22 июня (созвездие Близнецов) и 21 декабря (созвездие Козерога).

Так как эклиптика не совпадает с небесным экватором, в течение года непрерывно меняется угловое расстояние Солнца от экватора, т. е. его склонение. Поэтому высота Солнца в верхней кульминации меняется день ото дня: в июне склонение самое высокое, в декабре самое низкое.

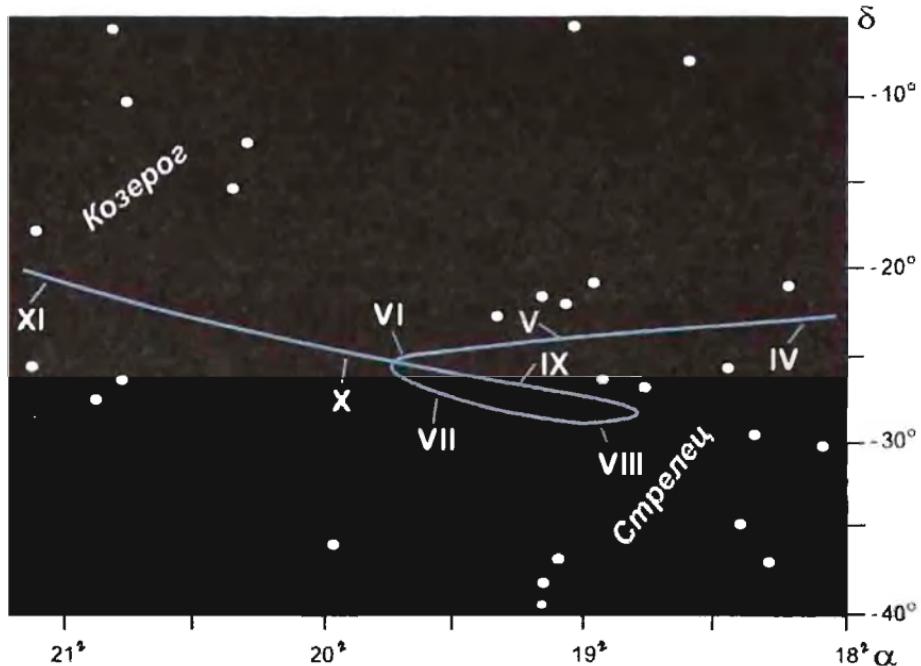


Рис. 41. Видимое движение Марса среди звезд в 1986 г. (римские цифры означают первые числа месяца)

Видимые движения планет. Помимо общего суточного движения, планеты на фоне звезд описывают сложные петлеобразные пуги (рис. 41), медленно перемещаясь то с запада на восток (*прямое движение*), то с востока на запад (*попятное движение*), а в момент смены направления движения происходит *стояние*. Если нанести этот путь на карту, то получится петля (рис. 42). Петлеобразное движение планет объясняется тем, что мы наблюдаем обращающиеся вокруг Солнца планеты не с неподвижной Земли, а с Земли, тоже движущейся вокруг Солнца. Скорость движения планеты по орбите тем больше, чем ближе она к Солнцу. Размеры петли зависят от расстояния между планетой и Землей: чем оно больше, тем петля меньше.

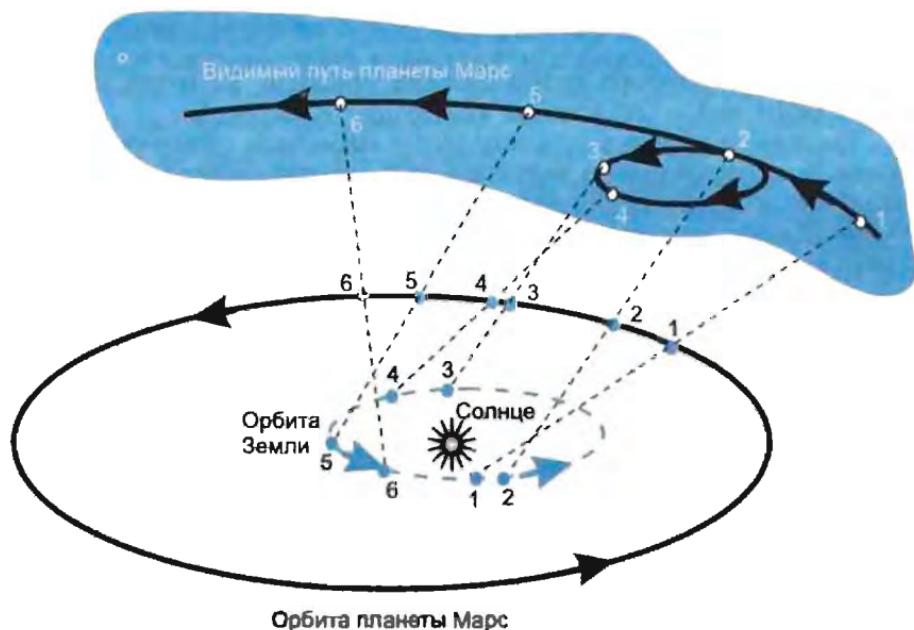


Рис. 42. К объяснению видимого петлеобразного движения планеты Марс

Обратите внимание: планеты описывают петли, а не просто движутся «туда-сюда» по одной линии, потому что плоскости их орбит не совпадают с плоскостью эклиптики (т. е. плоскостью земной орбиты). Впервые верное объяснение петлеобразному движению планет дал Н. Коперник.

В результате длительных наблюдений удалось выявить некоторые закономерности петлеобразных движений планет. Например, оказалось, что Меркурий никогда не удаляется от Солнца более чем на 28° , а для Венеры этот предельный угол составляет 48° . Остальные планеты могут находиться на любых угловых расстояниях от Солнца, даже диаметрально противоположно

Солнцу. В эти моменты планеты движутся среди звезд всегда попятно. Для каждой планеты длина дуги попятного движения имеет определенное значение. Для Марса она составляет около 14° , для Юпитера – 10° , для Сатурна – 7° .

? 1. В чем причина видимых движений Солнца и звезд по небу? 2. Что такое суточное движение? сутки? 3. Что понимается под кульминацией светил? Что такое верхняя и нижняя кульминации светил? 4. При каком условии на экваторе могут наблюдаваться все светила северного и южного полушарий неба? 5. Что такое эклиптика? 6. Что понимают под поясом зодиака? 7. Чем различаются прямое и попятное движение планеты на фоне звезд? 8. В какие дни года Солнце поднимается над горизонтом выше всего? ниже всего?

- 1. Используя рисунок 39, найдите точки весеннего и осеннего равноденствия. Как еще называются эти точки?
- 2. Используя рисунок 40, перечислите созвездия, которые входят в пояс зодиака.
- 3. Используя рисунок 41, определите, какие экваториальные координаты имела планета Марс в июне.
- ✳ 4. Используя рисунок 42, объясните прямое и попятное движения планеты Марс.

§ 7. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Изучение механического движения начнем с наиболее простого его вида – с движения, происходящего вдоль прямой линии, а из всего многообразия прямолинейных движений рассмотрим равномерное движение.

Строго говоря, в природе нет равномерного движения. Но при определенных условиях можно некоторые движения тел считать равномерными, например движение автомобиля на участке дороги, на котором нет спусков, подъемов, поворотов. Конечно, при движении автомобиля небольшие отклонения в ту или иную сторону от прямой всегда имеются: неровность шоссе, чуть-чуть большее нажатие на педаль газа и многие другие причины, вызывающие изменение скорости. На протяжении не слишком большого промежутка времени движение автомобиля можно считать равномерным и прямолинейным с достаточной для практических целей точностью.

Движение, при котором тело (материальная точка) за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения, называется равномерным.

Вдумаемся в данное определение. Изменение положения тела происходит во времени. Можно рассматривать положение тела за любой промежуток времени, например $\Delta t = 0,1$ с. или

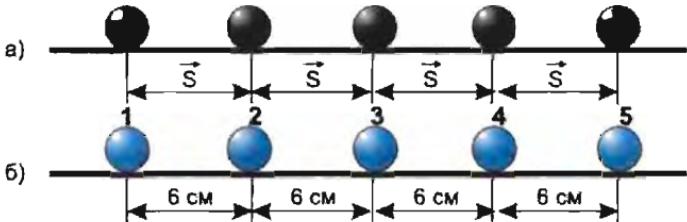


Рис. 43. Равномерное движение шарика по горизонтальному желобу

$\Delta t = 1$ с, или $\Delta t = 10$ с. За любой выбранный нами промежуток времени (например, $\Delta t = 10$ с) тело совершил одинаковые перемещения.

На рисунке 43, а показана стробоскопическая фотография равномерного и прямолинейного движения шарика по горизонтальному желобу. Так как в дальнейшем мы неоднократно будем пользоваться стробоскопическим методом изучения движений, кратко поясним, в чем он заключается. В темном помещении устанавливают фотоаппарат с открытым объективом так, чтобы в кадре расположился необходимый участок траектории. В момент начала движения тела специальная установка через равные, заранее известные промежутки времени дает кратковременные световые вспышки, фиксируя на фотопленке его положение.

Движение шарика по желобу будем считать равномерным, предполагая, что трение о поверхность желоба мало.

Приведите другие примеры, в которых движение тел можно считать равномерным и прямолинейным.

Скорость тела. Несмотря на то что слово «скорость» давно стало привычным, определить строго, что же такое скорость, не просто. Значение скорости показывает, как быстро движется тело, т. е. как быстро меняется с течением времени его положение в пространстве по отношению к другим телам.

Рассмотрим, что такое скорость тела.

При движении шарика (см. рис. 43, а) частота съемки 50 раз в секунду, т. е. время между вспышками $\Delta t = 1/50 = 0,02$ с. Перемещения шарика за каждые $\Delta t = 0,02$ с одинаковые, т. е. $s = \text{const}$ (рис. 43, б):

$$s = 6 \text{ см} = 0,06 \text{ м.}$$

Сравним отношение $s / \Delta t$ для каждого промежутка времени:

$$s / \Delta t = 0,06 / 0,02 = \dots = 0,06 / 0,02 = \text{const.}$$

$s / \Delta t$ – быстрота изменения перемещения тела, т. е. его *скорость*.

Скорость тела обозначается буквой латинского алфавита v (читается «вэ»).

\vec{s} – величина векторная, а промежуток времени Δt – скалярная. Частное от деления векторной величины на скалярную есть вектор. Скорость – векторная величина. Так как время – положительный скаляр, то направление вектора скорости совпадает с направлением вектора перемещения.

Скорость равномерного движения равна отношению перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \vec{s}/\Delta t.$$

Если начальный момент времени $t_0 = 0$, то $\Delta t = t$ и

$$\vec{v} = \vec{s}/t.$$

Поскольку скорость – постоянная величина ($\vec{v} = \text{const}$), то она служит характеристикой равномерного прямолинейного движения.

Из формулы скорости следует, что перемещение тела при равномерном движении определяется равенством

$$\vec{s} = \vec{v}t.$$

Это равенство получило название *уравнение движения тела*.

При решении задач будем использовать также и другое определение скорости.

Рассмотрим простой случай, когда автомобиль движется на горизонтальном участке дороги равномерно и прямолинейно (рис. 44, а). Телом отсчета будем считать дерево. Положительное направление координатной оси укажем по направлению движения автомобиля. В момент времени t_1 автомобиль имел координату x_1 , в момент времени t_2 его координата стала равной x_2 . За интервал (или промежуток) времени $\Delta t = t_2 - t_1$, изменение координаты тела равно $\Delta x = x_2 - x_1$ (рис. 44, б).

Величина, равная отношению изменения координаты тела Δx к промежутку времени Δt , за который это изменение координаты произошло, называется *скоростью тела*:

$$v = \Delta x/\Delta t = \text{const.}$$

Если в начальный момент времени $t = 0$, то $\Delta t = t$ и $v = (x - x_0)/t$.

Если движение тела прямолинейное, то два определения скорости совпадают.

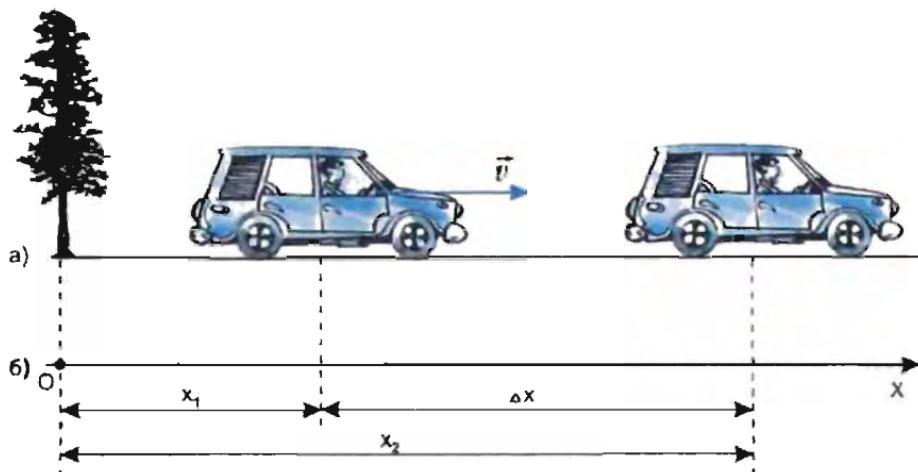


Рис. 44. Равномерное и прямолинейное движение автомобиля

За единицу скорости в Международной системе единиц (СИ) принимают метр в секунду (м/с).

Рассчитаем скорость шарика при движении его по желобу (см. рис. 43):

$$v = 0,06 \text{ м/0,02 с} = 3 \text{ м/с.}$$

Утверждение «скорость шарика равна 3 м/с» означает, что за каждую секунду шарик «проходит» по желобу путь, равный 3 м.

На практике используют и другие единицы скорости (км/ч, км/с, см/с и др.).

Координата и пройденный путь при равномерном прямолинейном движении. Рассмотрим движение мотоциклиста на прямолинейном участке трека (рис. 45). Будем изучать движение тела с момента времени $t_0 = 0$. Обозначим координату тела в момент времени $t_0 = 0$ через x_0 (начальная координата), в произвольный момент времени t через x (конечная координата). Точка 0 — тело отсчета. Считая движение одномерным, укажем положительное направление координатной оси OX по направлению, совпадающему с движением мотоциклиста (рис. 45, а).

Поскольку направление вектора скорости совпадает с выбранным нами положительным направлением координатной оси, то проекция вектора скорости

$$v_x > 0.$$

Используя определение скорости тела, запишем:

$$v = \Delta x / \Delta t = (x - x_0) / \Delta t = (x - x_0) / t.$$

Преобразуем уравнение:

$$vt = x - x_0 \Rightarrow x - x_0 = vt \Rightarrow x = x_0 + vt.$$

$$x = x_0 + vt$$

— уравнение зависимости координаты тела от времени.

Так как выбор положительного направления координатной оси произволен, то в том случае, когда ось OX направлена против движения мотоциклиста (рис. 45, б), проекция вектора скорости $v_x < 0$. Уравнение для скорости тела принимает следующий вид:

$$-v = (x - x_0)/t \Rightarrow -vt = x - x_0 \Rightarrow x_0 - vt = x \Rightarrow x = x_0 - vt.$$

$$x = x_0 - vt$$

— уравнение зависимости координаты тела от времени.

Уравнения $x = x_0 + vt$ и $x = x_0 - vt$ определяют координату тела, но не пройденный путь. Пройденный путь равен модулю изменения координаты:

$$s = |x - x_0|.$$

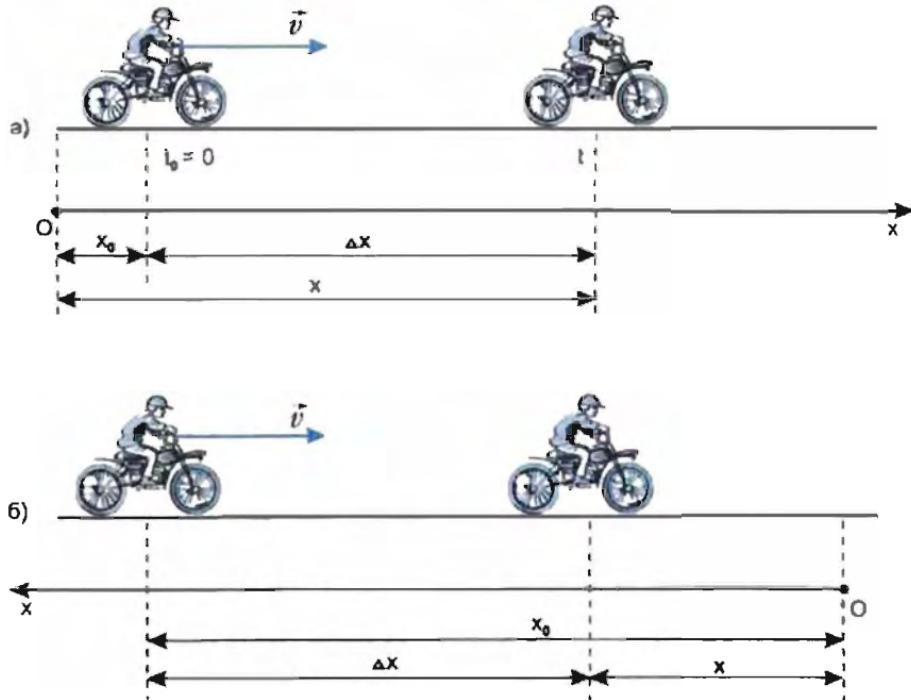


Рис. 45. Равномерное и прямолинейное движение мотоциклиста

Пройденный путь можно найти, зная модуль скорости:

$$s = vt.$$

В случае прямолинейного движения проекции вектора перемещения и скорости на траекторию движения тела совпадают с алгебраическим значением этих величин:

$$v_x = v, \quad s_x = s.$$

Поэтому модуль скорости записывают так:

$$v = s/t.$$

Вращается ли Земля равномерно? С большой степенью точности можно считать, что в системе отсчета, связанной с центром Земли, каждая точка земной поверхности движется вокруг оси вращения Земли равномерно (но не прямолинейно). Однако в 1754 г. И. Кант, развивая теорию приливов, доказал, что вращение Земли должно замедляться. Действительно, Земля и Луна притягиваются друг к другу. Поскольку отдельные участки нашей планеты находятся на разном расстоянии от Луны, то они притягиваются к Луне с разной силой. При суточном вращении Земли притяжение Луны вздымает в Мировом океане два приливных горба — подлунный и противолунный (рис. 46). На участках поверхности Земли, лежащих на линии Земля—Луна, уровень воды высокий — там наблюдаются *приливы*. В плоскости, перпендикулярной направлению линии Земля—Луна, уровень воды низкий — там наблюдаются *отливы*.



Рис. 46. Схема образования приливов и отливов

Земля, вращаясь, проворачивается между приливными горбами так, как если бы две громадные волны непрерывно перекатывались навстречу ее вращения. Луна вместе с Солнцем вызывает приливы в атмосфере и в земной коре, поскольку под корой тело Земли (мантия) ведет себя как жидкость. Дважды в сутки земная кора приподнимает людей над центром Земли на 50 см. Все виды приливов в сумме тормозят вращение нашей планеты так, что сутки удлиняются на 3,3 с каждые 100 тыс. лет.

? 1. Какое движение называется равномерным и прямолинейным? 2. Что является характеристикой равномерного прямолинейного движения и почему? 3. Домик полярников с дрейфующей льдиной за первые сутки переместился на 5 км, за вторые сутки — на 5 км, за третьи сутки — еще на 5 км и т. д. Можно ли считать такое движение равномерным? Ответ обоснуйте. 4. Как можно рассчитать скорость тела при его равномерном прямолинейном движении? Запишите формулу расчета скорости. Поясните величины, входящие в эту формулу. 5. Каковы единицы скорости, пути и времени в Международной системе единиц? 6. Вращается ли Земля равномерно?

● 1. Запишите соотношения между единицами скорости:

$$1 \text{ км/с} = \text{_____ м/с};$$

$$1 \text{ м/ч} = \text{_____ м/с};$$

$$36 \text{ км/ч} = \text{_____ м/с};$$

$$54 \text{ км/ч} = \text{_____ м/с};$$

$$1 \text{ км/ч} = \text{_____ м/с};$$

$$1 \text{ см/ч} = \text{_____ м/с};$$

$$72 \text{ км/ч} = \text{_____ м/с};$$

$$8 \text{ км/с} = \text{_____ м/с}.$$

2. На рисунке 47 стрелками обозначены скорости движения различных тел: а) скорость самолета; б) скорость автомобиля; в) скорость полета птицы; г) скорость пешехода. Масштаб указан на

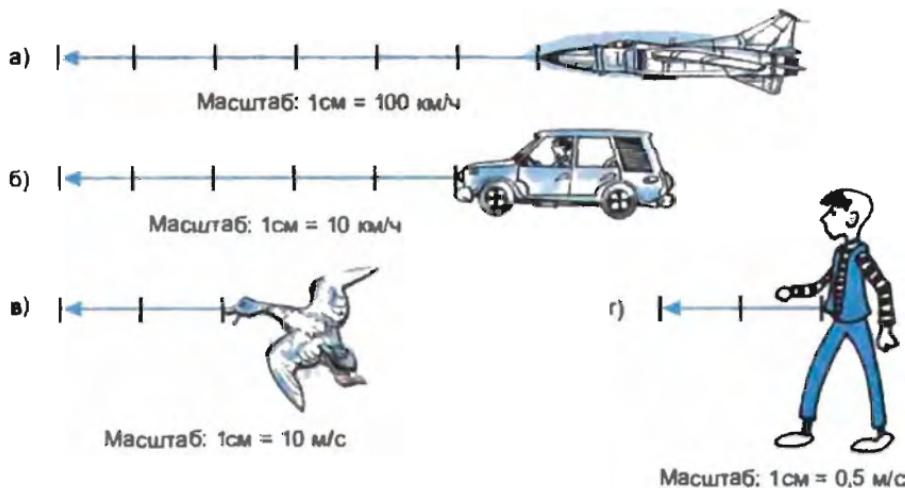


Рис. 47



Рис. 48

рисунке. Запишите значение скорости (в м/с) для каждого из тел.

3. Какая скорость больше: 1 км/ч или 1 м/с? 20 м/с или 36 км/ч? 2 м/с или 250 см/с? 54 км/ч или 15 м/с?

* С помощью измерительной линейки и секундомера рассчитайте скорость движения шарика в стеклянной трубке, наполненной маслом (рис. 48). Будет ли движение шарика в этой трубке равномерным? Ответ обоснуйте.

§ 8. СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

Для описания движения тела в выбранной системе отсчета используют различные способы. Рассмотрим некоторые из них.

Графическое изображение движения. Во многих случаях движение тел удобно изображать в виде графиков. Такой способ описания движения нагляден. Покажем это на примере изучения движения двух тел по шоссе: автомобиля 1 и мотоциклиста 2 (рис. 49).

Для построения графика зависимости скорости от времени $v = v(t)$ берут прямоугольную систему координат, по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают в определенном масштабе значение времени, а по вертикальной оси (оси ординат) — значение скорости. Так как при равномерном движении $v = \text{const}$, то график зависимости скорости от времени представляет собой прямую, параллельную оси времени. В случае, если движение тела совпадает с выбранным нами положительным направлением координатной оси, линия графика скорости располагается выше оси времени. Если же движение тела происходит в сторону, противоположную выбранному нами положительному направлению координатной оси, то линия графика скоро-

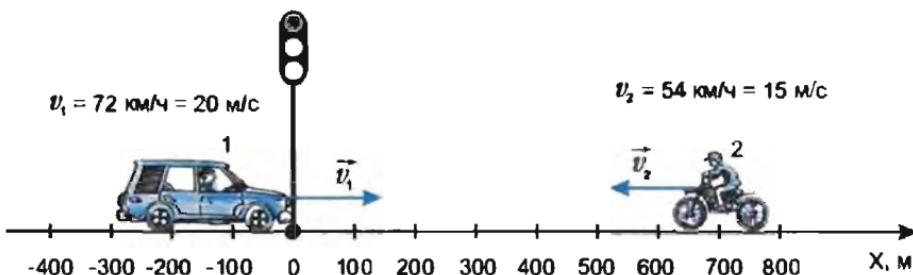


Рис. 49. Движение автомобиля (1) и мотоциклиста (2) по шоссе

сти располагается ниже оси времени.

На рисунке 50 представлены графики зависимости скорости движения автомобиля и мотоциклиста от времени $v = v(t)$. За тело отсчета выбран светофор, положительное направление координатной оси указано по движению автомобиля.

С помощью графика зависимости скорости от времени $v = v(t)$ можно определить пройденный телом путь. Вы знаете, что при равномерном движении путь определяется по формуле $s = vt$. Это произведение численно равно площади прямоугольника, сторонами которого служат оси координат (Ot и Os), линия графика и ордината, соответствующая времени движения тела. Покажем на графике $v = v(t)$ путь, пройденный автомобилем и мотоциклистом за 4 с (рис. 51).

Рассчитаем путь, пройденный автомобилем и мотоциклистом:

$$s_1 = v_1 t \Rightarrow s_1 = 20 \text{ м/с} \cdot 4 \text{ с} = 80 \text{ м}; \\ s_2 = v_2 t \Rightarrow s_2 = 15 \text{ м/с} \cdot 4 \text{ с} = 60 \text{ м}.$$

Зная скорость тела, можно определить путь, пройденный телом в любой момент времени. Уравнения для расчета пути можно записать в виде

$$s_1 = 20t \text{ — для автомобиля;} \\ s_2 = 15t \text{ — для мотоциклиста.}$$

Выразим значение пути, пройденного автомобилем и мотоциклистом, в момент времени $t = 1 \text{ с}$, $t = 2 \text{ с}$, $t = 3 \text{ с}$, $t = 4 \text{ с}$. Построим графики зависимости пути от времени $s = s(t)$ для каждого из тел (рис. 52).

Для того чтобы описать движение в выбранной системе отсчета, необходимо знать, как с течением времени изменяется координата движущегося тела. Математически эта зависимость записывается так: $x = x(t)$.

Выразим зависимость $x = x(t)$ для автомобиля и мотоциклиста. По рисунку 49 определим началь-

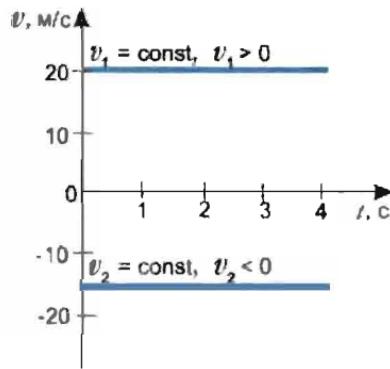


Рис. 50. График зависимости скорости от времени $v = v(t)$

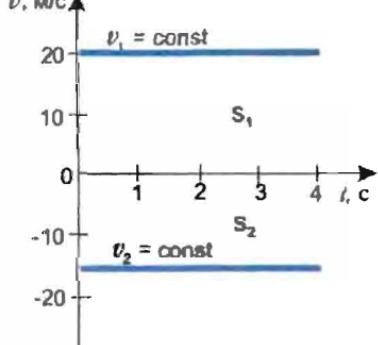


Рис. 51. Определение пути, пройденного телом, по графику зависимости $v = v(t)$

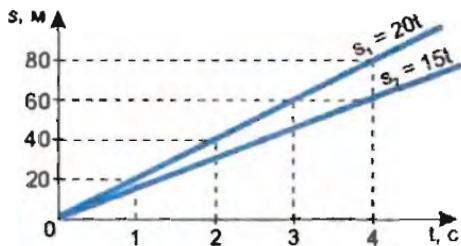


Рис. 52. График зависимости пути от времени $s = s(t)$

Уравнения движения тел дают нам возможность предвидеть дальнейший ход движения автомобиля и мотоциклиста. Например, мы можем ответить на вопрос: где будут находиться тела через 2 мин после начала движения? Это значит, что надо найти координату тела x (место на шоссе) при $t = 2$ мин = 120 с:

$$x_1 = -150 + 20 \cdot 120 = 2250 \text{ (м)}, \\ x_2 = 700 - 15 \cdot 120 = -1100 \text{ (м)}.$$

Ответ: автомобиль будет находиться в 2250 м вправо (знак «+») от тела отсчета (светофора), мотоциклист будет находиться в 1100 м влево (знак «-») от тела отсчета.

Изобразим графически зависимость координаты от времени $x = x(t)$ для автомобиля и мотоциклиста в одной системе координат (рис. 53). По горизонтальной оси (оси абсцисс) отклады-

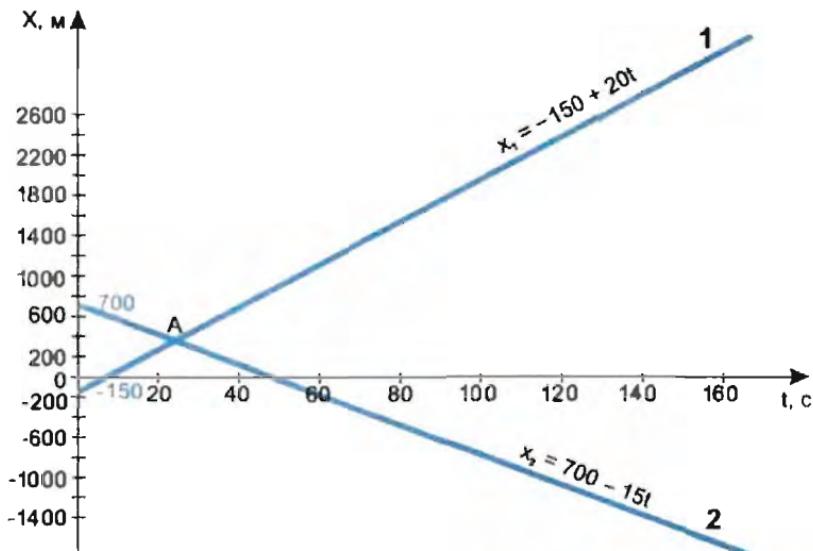


Рис. 53. График зависимости координаты движущегося тела от времени $x = x(t)$

вают в определенном масштабе времени t , по вертикальной оси (оси ординат) — координату x . Прямые 1 и 2 графически изображают движения тел в выбранной системе отсчета.

Вы, вероятно, обратили внимание на то, что линии графиков 1 и 2 пересекаются в некоторой точке A . Какой смысл имеет точка пересечения графиков? Это означает, что в момент встречи автомобиля и мотоциклиста координаты тел равны: $x_1 = x_2$. Приводя правые части уравнений: $-150 + 20t = 700 - 15t \Rightarrow 35t = 850 \Rightarrow t \approx 24,3$ с, т. е. автомобиль и мотоциклист встретятся через 24,3 с после начала движения. В этот момент координаты тел равны 335,5 м.

Табличный способ описания движения. При выполнении лабораторных работ или экспериментальных заданий результаты измерений чаще всего вы заносите в таблицу. Покажем, что по результатам анализа таблицы можно получить подробную информацию о движении тела. При изучении движения тела были получены такие данные:

| | | | | | | |
|---------------------------------|---|---|---|---|----|----|
| Время движения t , с | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Путь, пройденный телом, s , м | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |

Табличные данные позволяют построить по точкам график зависимости пути от времени $s = s(t)$ (рис. 54). Из таблицы и графика видно, что между пройденным путем и временем прямо пропорциональная зависимость; секундомер начал счет времени в момент начала движения тела; за равные промежутки времени тело проходит равные расстояния, т. е. движется равномерно. Иными словами, таблица и график позволяют ответить на следующие вопросы: когда тело будет находиться в той или иной точке траектории? Сколько времени потребуется ему, чтобы совершить то или иное перемещение? Как с течением времени меняется положение тела на траектории?

Используя таблицу или график, можно:

а) рассчитать скорость тела:

$$v = s/t; v = 3/1 = 6/2 = 9/3 = 12/4 = 15/5 = 3 \text{ м/с};$$

б) построить график зависимости

$$v = v(t) \text{ (рис. 55);}$$

в) записать уравнение для координаты тела в любой момент времени:

$$x = 3t, \text{ м};$$

г) построить график зависимости $x = x(t)$ (рис. 56).

Кинематический способ описания движения. В каждый момент времени

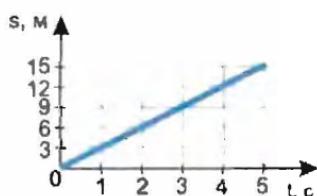


Рис. 54

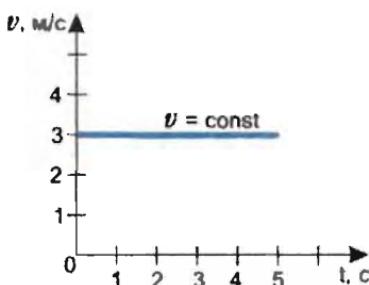


Рис. 55

t координата x имеет определенное значение. С течением времени происходит изменение координаты. На языке математики это означает, что координата — функция времени: $x = x(t)$. Вид этой функции в каждом конкретном случае будет вполне определенным.

Предположим, что движение грузового автомобиля описывается уравнением:

$$x = -270 + 12t, \text{ м.}$$

Какую информацию можно получить из этой функциональной зависимости?

Сравним уравнение движения грузового автомобиля и уравнение для координаты в общем виде:

$$\begin{cases} x = -270 + 12t, \\ x = x_0 \pm vt. \end{cases}$$

Из сравнения видно, что начальная координата $x_0 = -270$ м, скорость движения тела $v = 12$ м/с.

Если использовать уравнение $x = -270 + 12t$, можно построить график зависимости координаты тела от времени движения $x = x(t)$ (рис. 57). Линию графика можно построить по двум точкам: $x_0 = -270$ м и $t = 22,5$ с (в момент пересечения оси Ot $x = 0$, поэтому уравнение имеет вид $0 = -270 + 12t \Rightarrow t = 22,5$ с).

Из анализа уравнения движения автомобиля и графика зависимости координаты от времени $x = x(t)$

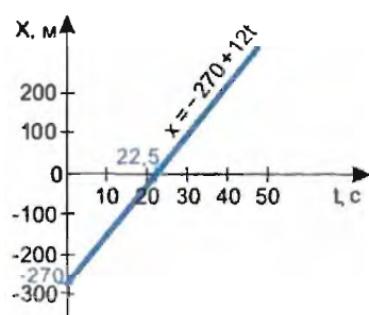


Рис. 56

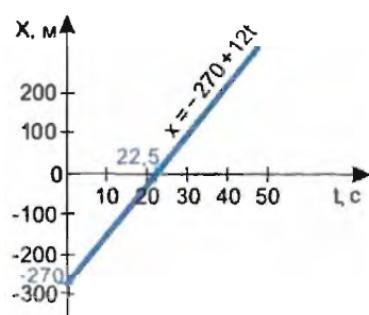


Рис. 57

можно прийти к следующему выводу: в момент начала отсчета времени ($t = 0$) автомобиль находится на расстоянии 270 м от тела отсчета; он движется в направлении, совпадающем с выбранным нами положительным направлением координатной оси; через 22,5 с от начала движения автомобиль «минует» тело отсчета.

Вы, вероятно, обратили внимание на то, что все рассмотренные способы описания движения тел взаимосвязаны.

Пример решения задачи

Движения двух пешеходов заданы уравнениями $x_1 = 100 - t$, м и $x_2 = 1,5t$, м.

Постройте графики зависимости $v = v(t)$, $s = s(t)$, $x = x(t)$. Найдите время и место их встречи.

Анализ условия. Сопоставив уравнения движения пешеходов с уравнением координаты тела $x = x_0 \pm vt$, можно определить для каждого пешехода начальную координату и скорость движения. Начальная координата первого пешехода $x_{01} = 100$ м (т. е. он находится на расстоянии 100 м от тела отсчета), его скорость $v_1 = -1$ м/с (он движется в направлении, противоположном положительному направлению координатной оси OX). Начальная координата второго пешехода $x_{02} = 0$ (положение тела совпадает с телом отсчета), его скорость $v_2 = 1,5$ м/с (он движется в направлении, совпадающем с положительным направлением координатной оси OX).

Решение

Построим графики зависимости $v = v(t)$, $s = s(t)$, $x = x(t)$ (рис. 58, а, б, в).

Встреча пешеходов означает, что они будут находиться в одном месте; в момент встречи их координаты будут равны

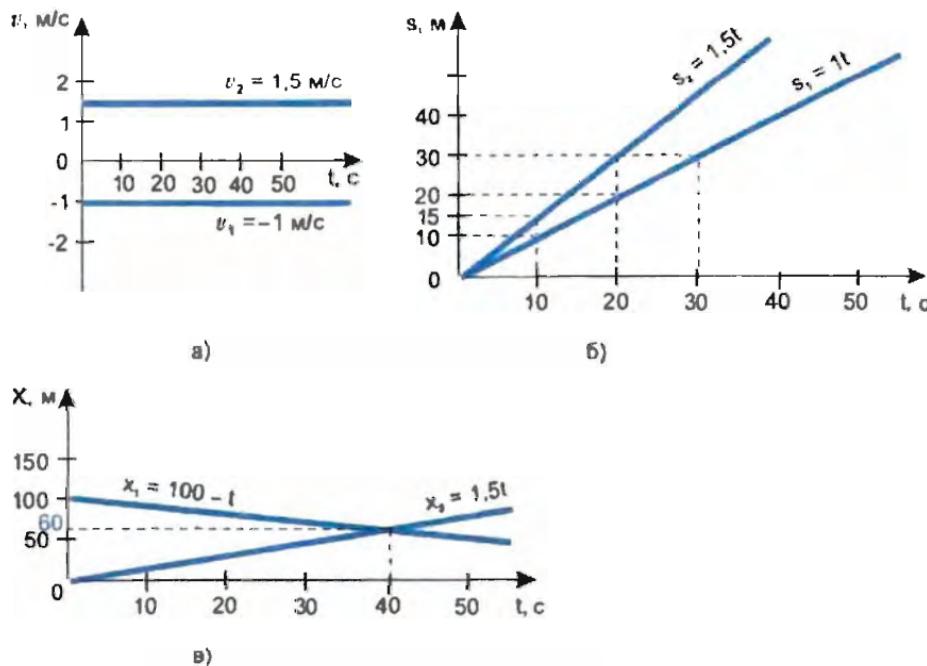


Рис. 58. Графики зависимости $v = v(t)$, $s = s(t)$, $x = x(t)$

$x_1 = x_2$ (см. рис. 58, в; точка пересечения графиков). Приравнивая правые части уравнений, имеем

$$100 - t = 1,5t \Rightarrow 100 = 2,5t \Rightarrow t = 100/2,5 = 40 \text{ с.}$$

Найти место встречи — это значит определить координату любого тела (в нашем случае пешеходов) через 40 с после начала движения. Подставив значение времени в любое из уравнений ($x_1 = 100 - 40 = 60$ м или $x_2 = 1,5 \cdot 40 = 60$ м), получим $x_1 = x_2 = 60$ м.

Итак, пешеходы встретятся через 40 с после начала движения в 60 м от тела отсчета.

⊕ При сравнении уравнений для координаты $x = x_0 \pm vt$ и пути $s = vt$ можно отметить у них ряд существенных различий.

Путь s всегда положительная величина и увеличивается со временем.

Координата x может быть как положительной, так и отрицательной: с течением времени может либо увеличиваться (если тело движется в сторону, совпадающую с положительным направлением координатной оси), либо уменьшаться (если тело движется в сторону, противоположную положительному направлению координатной оси).

В формуле пути скорость всегда положительна независимо от направления движения тела.

В уравнении координаты скорость может быть как положительной (если тело движется в сторону, совпадающую с положительным направлением координатной оси), так и отрицательной (если тело движется в сторону, противоположную положительному направлению координатной оси).

● 1. Используя график зависимости пути от времени $s = s(t)$ для равномерно движущегося тела (рис. 59), ответьте на следующие вопросы: 1) В каких единицах измеряется путь? В каких единицах измеряется время движения? 2) Чему равен путь, пройденный телом за 2 ч движения? за 4 ч движения? за 6 ч движения? 3) Чему равна скорость движения тела? Ответ обоснуйте.

2. На рисунке 60 представлен график зависимости пути, пройденного велосипедистом, от времени движения. Рассчитайте скорость велосипедиста (в км/ч, в м/с).

3. На рисунке 61 изображены графики зависимости пути от времени $s = s(t)$ для двух равномерно движущихся тел 1 и 2. Проанализировав графики, выполните следующие задания: 1) Определите скорости движения тел. Скорость какого тела больше? 2) В одной системе координат постройте графики зависимости скоростей тел от времени $v = v(t)$.

4. Используя графики зависимости скоростей движения автобуса 1 и мотоциклиста 2 от времени $v = v(t)$ (рис. 62), выполните следующие задания: 1) Определите скорости движения тел. Каков физический смысл знаков «+» и «-»? 2) Запишите уравнения для расчета пройденного пути каждого из тел в любой момент времени. 3) Рассчитайте путь, пройденный каждым

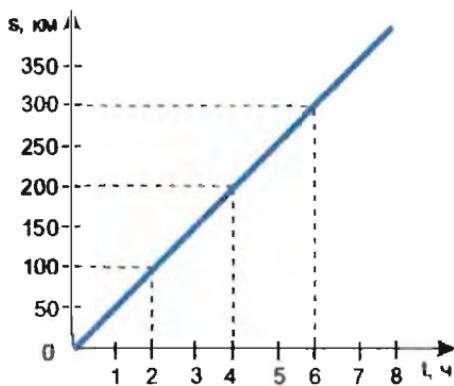


Рис. 59

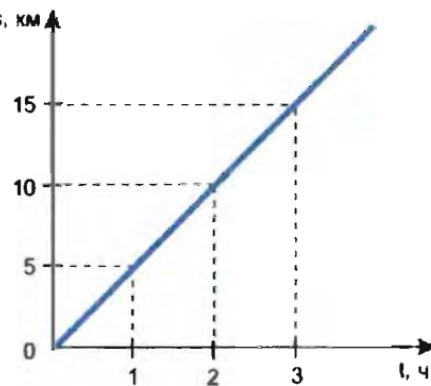


Рис. 60

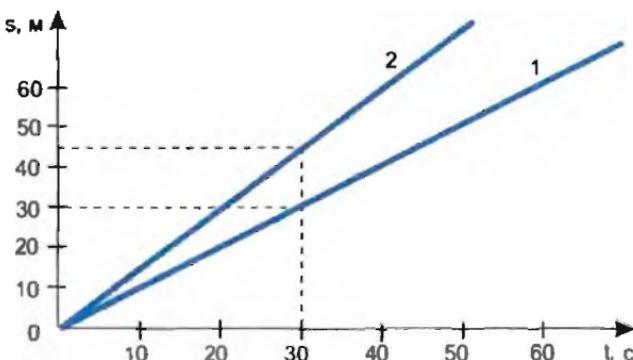


Рис. 61

дым телом за 1 мин движения. 4) Постройте график зависимости пути от времени $s = s(t)$ для каждого из тел в одной системе координат. Масштаб выберите самостоятельно.

5. На рисунке 63 изображен график зависимости координаты тела от времени $x = x(t)$. Используя рисунок, выполните следующие задания: 1) Определите начальную координату и скорость тела. Поясните смысл знаков \leftarrow и \rightarrow . 2) Напишите уравнение зависимости координаты от времени $x = x(t)$. 3) Постройте график зависимости скорости от времени $v = v(t)$ для данного тела. Масштаб выберите самостоятельно. 4) Постройте график зависимости пути от времени $s = s(t)$. Масштаб выберите самостоятельно.

6. На рисунке 64 приведен график зависимости координаты движения автомобиля от времени $x = x(t)$. Пользуясь графиком, выполните следующие задания: 1) Определите начальную координату и скорость автомобиля. Поясните смысл знаков \leftarrow и \rightarrow . 2) Напишите уравнение зависимости координаты тела от времени $x = x(t)$. 3) Постройте графики зависимости скорости от времени $v = v(t)$ и пути от времени $s = s(t)$. Масштаб выберите самостоятельно.

$x_1 = x_2$ (см. рис. 58, в; точка пересечения графиков). Приравнивая правые части уравнений, имеем

$$100 - t = 1,5t \Rightarrow 100 = 2,5t \Rightarrow t = 100/2,5 = 40 \text{ с.}$$

Найти место встречи – это значит определить координату любого тела (в нашем случае пешеходов) через 40 с после начала движения. Подставив значение времени в любое из уравнений ($x_1 = 100 - 40 = 60$ м или $x_2 = 1,5 \cdot 40 = 60$ м), получим $x_1 = x_2 = 60$ м.

Итак, пешеходы встретятся через 40 с после начала движения в 60 м от тела отсчета.

• При сравнении уравнений для координаты $x = x_0 \pm vt$ и пути $s = vt$ можно отметить у них ряд существенных различий.

Путь s всегда положительная величина и увеличивается со временем.

Координата x может быть как положительной, так и отрицательной: с течением времени может либо увеличиваться (если тело движется в сторону, совпадающую с положительным направлением координатной оси), либо уменьшаться (если тело движется в сторону, противоположную положительному направлению координатной оси).

В формуле пути скорость всегда положительна независимо от направления движения тела.

В уравнении координаты скорость может быть как положительной (если тело движется в сторону, совпадающую с положительным направлением координатной оси), так и отрицательной (если тело движется в сторону, противоположную положительному направлению координатной оси).

■ 1. Используя график зависимости пути от времени $s = s(t)$ для равномерно движущегося тела (рис. 59), ответьте на следующие вопросы:
1) В каких единицах измеряется путь? В каких единицах измеряется время движения? 2) Чему равен путь, пройденный телом за 2 ч движения? за 4 ч движения? за 6 ч движения? 3) Чему равна скорость движения тела? Ответ обоснуйте.

2. На рисунке 60 представлен график зависимости пути, пройденного велосипедистом, от времени движения. Рассчитайте скорость велосипедиста (в км/ч, в м/с).

3. На рисунке 61 изображены графики зависимости пути от времени $s = s(t)$ для двух равномерно движущихся тел 1 и 2. Проанализировав графики, выполните следующие задания: 1) Определите скорости движения тел. Скорость какого тела больше? 2) В одной системе координат постройте графики зависимости скоростей тел от времени $v = v(t)$.

4. Используя графики зависимости скоростей движения автобуса 1 и мотоцикла 2 от времени $v = v(t)$ (рис. 62), выполните следующие задания: 1) Определите скорости движения тел. Каков физический смысл знаков \leftarrow и \rightarrow ? 2) Запишите уравнения для расчета пройденного пути каждого из тел в любой момент времени. 3) Рассчитайте путь, пройденный каж-

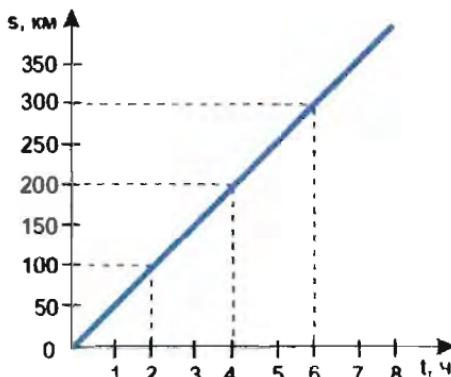


Рис. 59

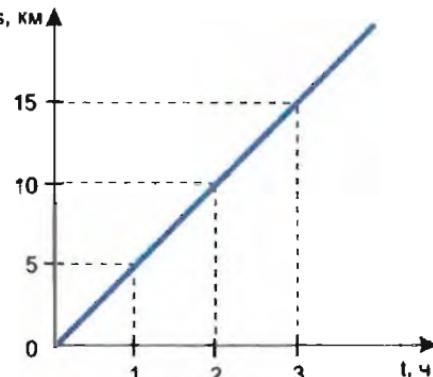


Рис. 60

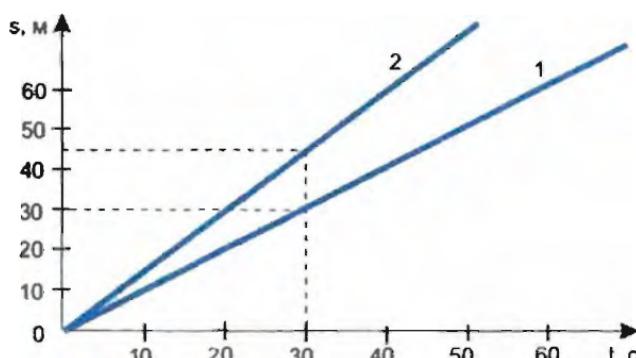


Рис. 61

дым телом за 1 мин движения. 4) Постройте график зависимости пути от времени $s = s(t)$ для каждого из тел в одной системе координат. Масштаб выберите самостоятельно.

5. На рисунке 63 изображен график зависимости координаты тела от времени $x = x(t)$. Используя рисунок, выполните следующие задания:
 1) Определите начальную координату и скорость тела. Поясните смысл знаков $\leftarrow + \rightarrow$ и $\leftarrow - \rightarrow$. 2) Напишите уравнение зависимости координаты от времени $x = x(t)$. 3) Постройте график зависимости скорости от времени $v = v(t)$ для данного тела. Масштаб выберите самостоятельно. 4) Постройте график зависимости пути от времени $s = s(t)$. Масштаб выберите самостоятельно.

* 6. На рисунке 64 приведен график зависимости координаты движения автомобиля от времени $x = x(t)$. Пользуясь графиком, выполните следующие задания: 1) Определите начальную координату и скорость автомобиля. Поясните смысл знаков $\leftarrow + \rightarrow$ и $\leftarrow - \rightarrow$. 2) Напишите уравнение зависимости координаты тела от времени $x = x(t)$. 3) Постройте графики зависимости скорости от времени $v = v(t)$ и пути от времени $s = s(t)$. Масштаб выберите самостоятельно.

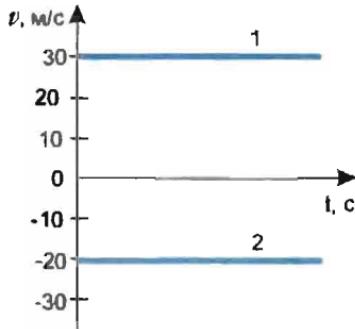


Рис. 62

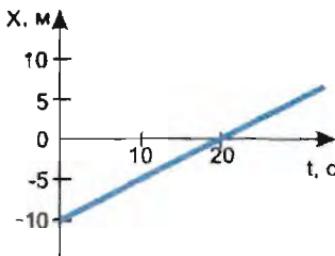


Рис. 63

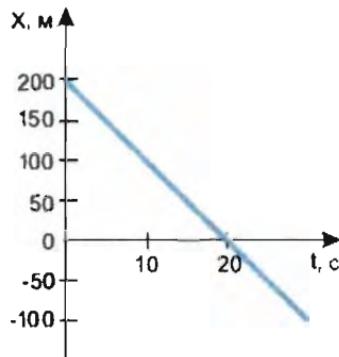


Рис. 64

- * 7. Движение двух тел заданы уравнениями $x_1 = 6t$, м и $x_2 = 40 + 2t$, м.
- 1) Используя уравнения, постройте графики зависимостей $v = v(t)$, $s = s(t)$, $x = x(t)$. Масштаб выберите самостоятельно. 2) Используя уравнения движения тел и построенные графики зависимости координаты от времени $x = x(t)$, ответьте на вопросы:
 а) Когда первое тело догонит второе? б) Где место встречи этих тел? в) Где находилось второе тело в момент, когда координата первого тела была равна 30 м? г) Когда расстояние между этими телами будет равно 20 м?

§ 9. СРЕДНЯЯ И МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ ТЕЛА

Часто приходится иметь дело с таким движением, при котором скорость тела изменяется. Движение с изменяющейся скоростью — это неравномерное движение. Для характеристики неравномерного движения вводятся такие понятия, как: средняя скорость и мгновенная скорость.

Средняя скорость. В таблице 4 приведены значения скоростей различных тел.

Таблица 4

Скорости различных тел

| Тело | Скорость v , м/с |
|----------------------|--------------------|
| Автомобиль «Москвич» | 19,4 |
| Ворона | 7,0 |

| Тело | Скорость v , м/с |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Дрейфующий ледник | $3 \cdot 10^{-6}$ |
| Земля (при движении вокруг Солнца) | $3 \cdot 10^4$ |
| Молекула оксида углерода (при температуре $t = 20^\circ\text{C}$) | 471,0 |
| Подача мяча в теннисе | 50,0 |
| Рост человеческого волоса | $5 \cdot 10^{-9}$ |
| Спринтер | 10,2 |

Проанализируем некоторые табличные данные.

Пример 1. Скорость роста человеческого волоса $5 \cdot 10^{-9}$ м/с = 15 см/год. Она зависит от ряда причин: возраста человека, сезона года и т. д. Поэтому можно утверждать, что указанная скорость средняя.

Пример 2. Скорость вращения Земли вокруг Солнца примерно $3 \cdot 10^4$ м/с = 30 км/с (точнее, 29,76 км/с). Но Земля движется по орбите вокруг Солнца неравномерно, и ее скорость в зависимости от положения на орбите с течением времени немножко меняется (рис. 65). Земля проходит точку перигелия в январе, а точку афелия в июле. Так как Земля быстрее движется, когда в северном полушарии зима, а в южном — лето, то зима в наших широтах короче лета. Поэтому в южном полушарии более суровая зима.

Пример 3. Скорость автомобиля «Москвич» 19,4 м/с = 70 км/ч. Это значение не может характеризовать движение тела, так как движение может быть с остановками, по извилистой дороге или по кругу.

Все три примера относятся к средней скорости движения тела. Что же такое средняя скорость?

Средняя скорость определяется отношением всего пройденного пути к полному времени движения. Средняя скорость обозначается так: $\langle v \rangle$ или \bar{v} . В дальнейшем будем обозначать скорость \bar{v} :

$$\bar{v} = s/t,$$



Рис. 65. Неравномерное движение Земли вокруг Солнца. *Перигелий* — наиболее близкая к Солнцу точка орбиты Земли, *афелий* — наиболее удаленная точка орбиты Земли

где \bar{v} — средняя скорость движения тела; s — весь пройденный путь; t — полное время движения тела.

Примеры решения задач

Задача 1. Автомобиль проехал первые 30 км с постоянной скоростью 120 км/ч, потом еще 30 км со скоростью 40 км/ч. Чему равна средняя скорость автомобиля (в км/ч)?

$$\bar{v} = ?$$

$$s_1 = s_2 = 30 \text{ км}$$

$$v_1 = 120 \text{ км/ч}$$

$$v_2 = 40 \text{ км/ч}$$

Решение

Определим среднюю скорость движения автомобиля:

$$\bar{v} = (s_1 + s_2)/(t_1 + t_2).$$

Рассчитаем время движения на каждом участке пути:

$$t_1 = s_1/v_1; \quad t_1 = \frac{30 \text{ км}}{120 \text{ км/ч}} = 0,25 \text{ ч};$$

$$t_2 = s_2/v_2; \quad t_2 = \frac{30 \text{ км}}{40 \text{ км/ч}} = 0,75 \text{ ч}.$$

Тогда его средняя скорость движения равна:

$$\bar{v} = (30 + 30)/(0,25 + 0,75) = 60 \text{ (км/ч)}.$$

Ответ: средняя скорость автомобиля равна 60 км/ч.

• **Обратите внимание** на то, что среднюю скорость нельзя определить простым усреднением v_1 и v_2 : $v_{cp} = (v_1 + v_2)/2$; $v_{cp} = (120 + 40)/2 = 80 \text{ км/ч}$, т. е.

$$\bar{v} \neq v_{cp}.$$

• **Задача 2.** Автомобиль совершает круговое движение. На рисунке 66 представлены траектория движения тела и положительное направление координатной оси Ox . Каковы были средние скорости в разных этапах движения?

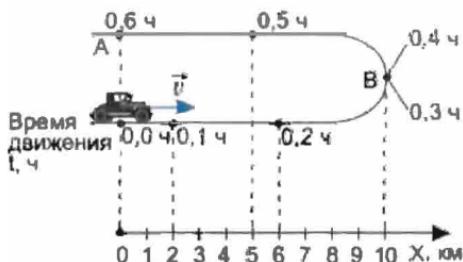


Рис. 66

Анализ условия. Из рисунка видно, что путь, пройденный телом за 0,6 ч, равен 20 км. Первые 2 км были им преодолены за 0,1 ч. На 6-м километре автомобиль оказался спустя 0,2 ч, а в пункт B прибыл через 0,3 ч. Водитель, прежде чем отправиться

в обратный путь, провел в пункте B 0,1 ч. Через 0,2 ч автомобиль прибыл в пункт назначения A .

Из рисунка 66 видно, что в интервалах времени 0–0,1 ч и 0,1–0,3 ч автомобиль двигался в направлении, совпадающем с направлением координатной оси OX ; 0,3–0,4 ч – тело покоялось; 0,4–0,6 ч – автомобиль двигался в направлении, противоположном положительному направлению координатной оси.

Решение

$$\begin{aligned}\bar{v}_1 &= s/\Delta t = \Delta x/\Delta t = (x-x_0)/(t-t_0); \\ \bar{v}_1 &= (2-0)/(0,1-0) = 2/0,1 = 20 \text{ км/ч}, \\ \bar{v}_2 &= (10-2)/(0,3-0,1) = 8/0,2 = 40 \text{ км/ч}, \\ \bar{v}_3 &= (10-10)/(0,4-0,3) = 0/0,1 = 0 \text{ км/ч}, \\ \bar{v}_4 &= (0-10)/(0,6-0,4) = -10/0,2 = -50 \text{ км/ч}.\end{aligned}$$

Мгновенная скорость. Средняя скорость характеризует движение тела на определенном участке траектории, но не дает информации о его движении в определенной точке траектории, т.е. не позволяет вычислить его координату в любой момент времени. Для нахождения положения тела в любой момент времени необходимо знать скорость в данный момент времени, т.е. мгновенную скорость. Когда говорят «в данный момент времени», то подразумевают очень малый промежуток времени ($\Delta t \rightarrow 0$); когда говорят «в данной точке траектории» – очень малый путь ($s \rightarrow 0$) и малое изменение координаты ($\Delta x \rightarrow 0$). При этих условиях средняя скорость в данной точке траектории приближается к значению мгновенной скорости.

При движении вдоль траектории тела в любой ее точке имеют определенное значение скорости. Мгновенная скорость показывает, в каком направлении двигалось бы тело и какой путь проходило бы оно в каждую секунду, если бы с данного момента времени движение стало равномерным и прямолинейным. Например, мгновенная скорость равна 10 м/с. Это означает, что если бы с этого момента движение тела стало бы равномерным и прямолинейным, оно проходило бы в каждую секунду равные пути $s = \Delta x = 10$ м.

При неравномерном движении мгновенная скорость тела непрерывно изменяется от точки к точке, от одного момента времени к другому. Для ее измерения созданы специальные приборы. Наиболее распространенный из них – спидометр (от англ. speed – скорость и греч. μετρέω – измеряю). Вы неоднократно видели спидометры на автомобилях (рис. 67). Указатели скорости устанавливаются на самолетах. Существуют специальные приборы, которые позволяют определить мгновенную скорость движения любого движущегося объекта с неподвижной или движущейся патрульной машины.

В дальнейшем для обозначения мгновенной скорости будем использовать термин «скорость», а для обозначения средней по

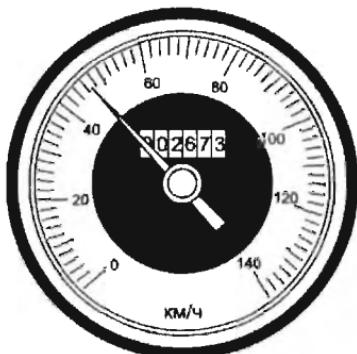


Рис. 67. Спидометр

времени скорости — термин «средняя скорость». Именно мгновенная, а не средняя скорость играет в механике основную роль.

Скорости звезд и планет. Наблюдения и измерения показывают, что космические объекты — звездные системы (галактики), звезды, планеты и др. — движутся. Некоторые галактики удаляются от Земли со скоростью более 100 000 км/с.

Скорости, с которыми движутся звезды, составляют десятки и сотни километров в секунду. Поскольку расстояния до звезд велики,

то обнаружить движение их по небу очень сложно. Методы определения скоростей звезд достаточно сложны; с одним из них вы ознакомитесь в старших классах. Впервые способ определения скоростей звезд по лучу зрения от наблюдателя (так называемых лучевых скоростей) предложил французский физик Арман Ипполит Луи Физб в 1848 г. Этот способ позволил в 1868 г. измерить лучевую скорость Сириуса (α Б. Пса). Оказалось, что он приближается к Земле со скоростью примерно 8 км/с. Позднее были измерены лучевые скорости всех наиболее ярких звезд. Например, Альдебаран (α Тельца) удаляется от Земли со скоростью 54 км/с. Большинство звезд, сравнительно близких к Солнцу, движется относительно него со скоростями, не превышающими 30 км/с. Средняя скорость движения Солнца по орбите вокруг ядра Галактики составляет около 200 км/с.

Наиболее точно рассчитаны средние скорости движения планет по орбите вокруг Солнца — так называемые орбитальные скорости (табл. 5). Средняя скорость движения Луны по орбите равна 1,03 км/с.

Таблица 5

Орбитальная скорость планет Солнечной системы

| Планета | Средняя скорость v , км/с |
|----------|-----------------------------|
| Меркурий | 47,9 |
| Венера | 35,0 |
| Земля | 29,8 |
| Марс | 24,1 |
| Юпитер | 13,1 |

| Планета | Средняя скорость v , км/с |
|---------|-----------------------------|
| Сатурн | 9,6 |
| Уран | 6,8 |
| Нептун | 5,4 |
| Плутон | 4,7 |

■ 1. Автомобиль преодолевал за каждый час 50 км. Можно ли утверждать, что его движение равномерное? Ответ обоснуйте.

2. На участке дороги установлен дорожный знак (рис. 68). Какое значение скорости — среднее или мгновенное — показывает этот знак?

3. Используя рисунок 67, ответьте на вопросы: 1) В каких единицах измеряет скорость данный спидометр? 2) Каков нижний предел измерения прибора? 3) Каков верхний предел измерения прибора? Какова цена деления спидометра? 4) Какова инструментальная погрешность прибора? 5) Каково показание спидометра? 6) Как выразить скорость в метрах в секунду (м/с)?

4. Определите свою среднюю скорость при беге на дистанцию 100 м. Сравните значение средней скорости с мировым рекордом.

* 5. Футболист пробегает за мяч около 15 км. Какова его средняя скорость? Сравните скорость футболиста со скоростью пешехода (около 1,3 м/с), велосипедиста-туриста (около 8 м/с), стрекозы (около 10 м/с), теплохода на воздушной подушке (около 22 м/с).

6. Первую половину пути поезд движется со скоростью 40 км/ч, вторую — со скоростью 60 км/ч. Чему равна его средняя скорость?

7. Какой путь пройдет автомобиль за 15 мин движения? Дополнительные данные вы получите из анализа рисунка 69.

8. Сможет ли пешеход достичь населенного пункта за полчаса, двигаясь со средней скоростью 1,5 м/с? Дополнительные данные вы получите из анализа рисунка 70.

9. За какое время лыжник пройдет расстояние, равное 20 км? Дополнительные данные вы получите из анализа рисунка 71. Время движения лыжника выразите в секундах, минутах и часах.

70

Рис. 68



Масштаб:
1 см = 40 км/ч

Рис. 69



Рис. 70

* 10. Самолет пролетел 600 км за 45 мин. Чему равна средняя скорость самолета? Изобразите на рисунке скорость его движения (в км/ч) в заданном масштабе: 1 см = 100 км/ч.

* 11. Скорость зайца 15 м/с, а скорость дельфина 72 км/ч. Выполните следующие задания: 1) Сравните скорости животных. Заяц или дельфин имеет большую скорость? 2) Постройте в одной системе координат графики зависимости скоростей от времени $v = v(t)$ для зайца и дельфина. Масштаб скорости и времени движения выберите самостоятельно. 3) Используя построенные вами графики зависимости скоростей от времени, рассчитайте путь, проходимый зайцем и дельфином за 3 с движения.

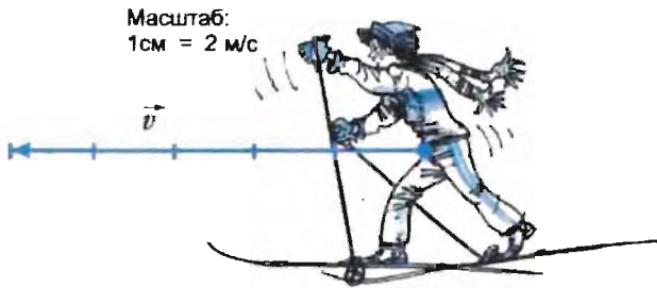


Рис. 71

§ 10. РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Для увеличения скорости движения автомобиля вы жмете на газ. Пользуясь тормозами, можно уменьшить скорость. В любом случае существенно то, что происходит изменение скорости Δv . Для простоты будем рассматривать такое неравномерное движение, при котором скорость тела (материальной точки) за любые равные промежутки времени изменяется одинаково.

Движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется одинаково, называется равноускоренным.

Ускорение тела. При равноускоренном движении быстрота изменения скорости $\Delta v / \Delta t = \text{const}$.

Величина, равная отношению изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло, называется ускорением тела.

Обозначается ускорение буквой латинского алфавита *a*:

$$\vec{a} = \Delta \vec{v} / \Delta t,$$

где $\Delta \vec{v}$ – изменение скорости (векторная величина); Δt – промежуток времени (скалярная величина).

Частное от деления векторной величины на скалярную есть вектор. Ускорение – векторная величина. Так как время – положительный скаляр, то направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора изменения скорости.

Изменение скорости определяется разностью между конечной и начальной скоростями движения тела:

$$\Delta v = v - v_0,$$

где v – конечная скорость тела; v_0 – начальная его скорость.

Если промежуток времени мал, то $\Delta t = t$. Ускорение будет определяться равенством

$$\vec{a} = (\vec{v} - \vec{v}_0) / t.$$

В Международной системе единиц (СИ) $[v] = \text{м/с}$, $[t] = \text{с}$. Следовательно, в СИ ускорение выражается в метрах на секунду в квадрате: $[a] = \text{м/с}^2$.

За единицу ускорения в СИ принимается ускорение такого равнускоренного движения, при котором за время 1 с скорость тела (материальной точки) изменяется на 1 м/с.

Например, модуль ускорения автомобиля 0,6 м/с². Это означает, что за каждую секунду скорость автомобиля изменяется на 0,6 м/с.

● В таблице приведены значения ускорений различных тел. Используя табличные данные, объясните, что означает значение ускорения для каждого из тел.

| Движение тела | Ускорение <i>a</i> , м/с ² |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| Пассажирский лифт при торможении | 0,5 |
| Пригородный электропоезд при разгоне | 0,7 |
| Вагоны метрополитена при разгоне | 0,8 |
| Самолет Ил-62 при разбеге | 1,7 |
| Трамвай при экстренном торможении | 3,0 |
| Аварийное торможение легкового автомобиля | 7,0 |

* В технике ускорение измеряют специальным прибором, который называется *акселерометром* (от лат. *accelero* — ускорение и *metrō* — измеряю).

Проекции скорости и ускорения. Чтобы определить направление вектора ускорения, надо знать направление вектора изменения скорости.

При равноускоренном прямолинейном движении вектор ускорения находится на одной прямой с вектором скорости в любой момент времени. В этом случае вектор ускорения, так же как и вектор скорости, может иметь только два направления: либо в сторону, совпадающую с выбранным нами положительным направлением координатной оси, либо в сторону, противоположную выбранному нами положительному направлению координатной оси.

Рассмотрим движения двух тел.

Пример 1. Мотоциклист, двигаясь из состояния покоя, через 5 с развил скорость 12 м/с (рис. 72, а). Чему равно ускорение тела и как оно направлено?

За тело отсчета выберем дерево. Положительное направление координатной оси укажем по направлению движения мотоциклиста. В начальный момент времени ($t = 0$) скорость тела равна нулю ($v_0 = 0$), в момент времени t ($t = 5$ с) его скорость стала равной $v = 12$ м/с. Изменение скорости $\Delta v = v - v_0 = 12$ м/с.

Ускорение мотоциклиста равно:

$$a = \Delta v / \Delta t; \quad a_1 = 12 \text{ м/с} / 5 \text{ с} = 2,4 \text{ м/с}^2, \quad a > 0.$$

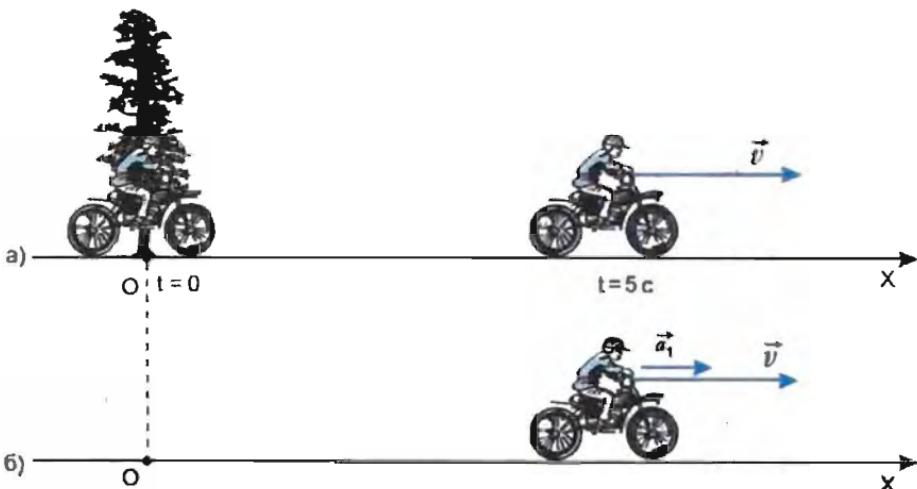


Рис. 72. Равноускоренное прямолинейное движение мотоциклиста

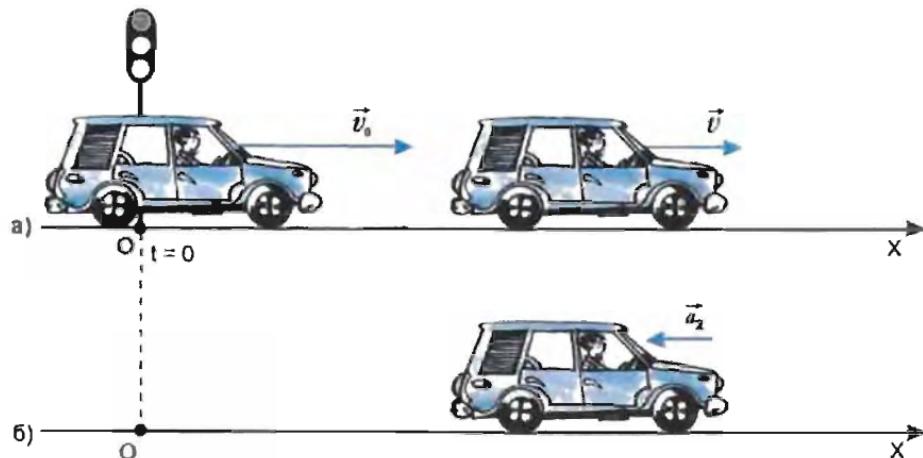


Рис. 73. Равноускоренное прямолинейное движение автомобиля

Отсюда следует, что направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора изменения скорости (с положительным направлением координатной оси OX) (рис. 72, б).

Пример 2. Автомобиль, двигаясь со скоростью 20 м/с, начал тормозить, и через 5 с его скорость стала равной 10 м/с (рис. 73, а). Чему равно ускорение автомобиля и как оно направлено?

За тело отсчета выберем светофор. Положительное направление координатной оси укажем по направлению начальной скорости автомобиля (см. рис. 73, а). Изменение скорости автомобиля:

$$\Delta v = v - v_0; \Delta v = 10 \text{ м/с} - 20 \text{ м/с} = -10 \text{ м/с}, \Delta v < 0.$$

Его ускорение равно:

$$a = \Delta v / \Delta t; a_2 = -\frac{10 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = -2 \text{ м/с}^2, a_2 < 0.$$

Отсюда следует, что направление вектора ускорения противоположно выбранному нами положительному направлению координатной оси OX , совпадающему с направлением изменения вектора скорости (см. рис. 73, б).

Скорость тела при равноускоренном движении. Из определения ускорения

$$\vec{a} = (\vec{v} - \vec{v}_0)/t$$

выразим скорость тела в момент времени t :

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

Отсюда можно сделать вывод, что мгновенная скорость при равноускоренном движении линейно зависит от времени движения.

Если $a > 0$, то уравнение имеет вид $v = v_0 + at$.

Если $a < 0$, то уравнение имеет вид $v = v_0 - at$.

Запишем уравнение движения для мотоциклиста и автомобиля (примеры 1 и 2):

Для мотоциклиста:

$$v_1 = a_1 t;$$

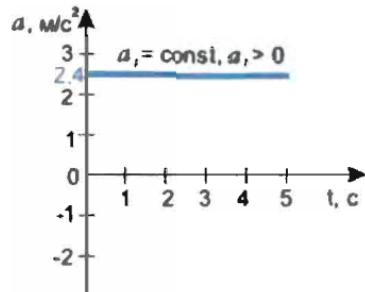
$$v_1 = 2,4t, \text{ м/с.}$$

Для автомобиля:

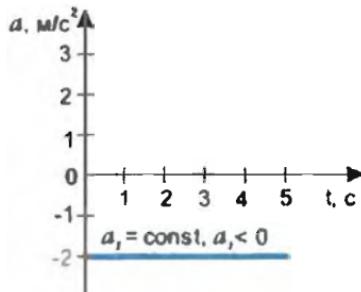
$$v_2 = a_2 t;$$

$$v_2 = 20 - 2t, \text{ м/с.}$$

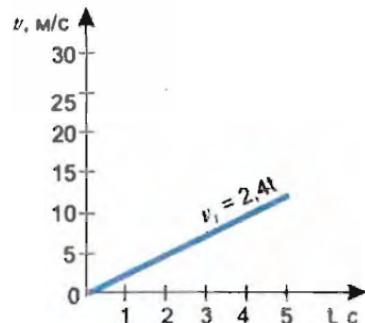
Графики зависимости скорости и ускорения от времени. Как и в случае равномерного прямолинейного движения, при описании равноускоренного движения тела в выбранной системе отсчета используют различные способы. На основе данных, приведенных в примерах 1 и 2, построим графики зависимости ускорения от времени $a = a(t)$ и скорости от времени $v = v(t)$ для мотоциклиста (рис. 74, а, б) и автомобиля (рис. 75, а, б).



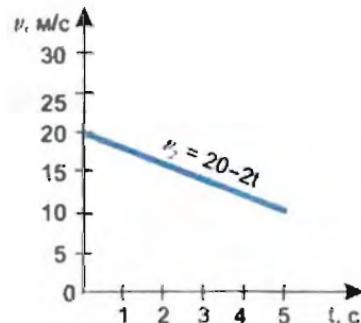
а)



а)



б)



б)

Рис. 74. Графики зависимости ускорения и скорости от времени движения мотоциклиста

Рис. 75. Графики зависимости ускорения и скорости от времени движения автомобиля

Пример решения задачи

Уравнение скорости движения мотоциклиста задано выражением

$$v = 10 + 0.4t, \text{ м/с.}$$

Какова скорость мотоциклиста через 10 с после начала движения? Когда его скорость будет равна 16 м/с? Когда мотоциклист начал движение, если считать, что характер движения сохранился?

Анализ условия. Сравним уравнение движения мотоциклиста и уравнение для скорости в общем виде:

$$\begin{cases} v = 10 + 0.4t, \\ v = v_0 + at. \end{cases}$$

Из сравнения видно, что его начальная скорость $v_0 = 10$ м/с, ускорение $a = 0.4$ м/с².

$$v - ? \quad t_1 - ? \quad t_2 - ?$$

$$\begin{aligned} v_0 &= 10 \text{ м/с} \\ a &= 0.4 \text{ м/с}^2 \\ t &= 10 \text{ с} \end{aligned}$$

Решение

Найдем мгновенную скорость тела при $t = 10$ с:

$$\begin{aligned} v &= 10 + 0.4t; \\ v &= 10 + 0.4 \cdot 10 = 14 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Для определения t_1 запишем уравнение:

$$16 = 10 + 0.4 t_1 \Rightarrow 6 = 0.4 t_1 \Rightarrow t_1 = 6/0.4 = 15 \text{ с.}$$

Через 15 с скорость мотоциклиста будет равна 16 м/с.

При определении t_2 учтем, что $v = 0$ (мотоциклист начал движение):

$$0 = 10 + 0.4 t_2 \Rightarrow t_2 = -10/0.4 = -25 \text{ с}$$

(т. е. мотоциклист начал движение за 25 с от начала наблюдения).

§ 11. ПУТЬ И КООРДИНАТА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Путь при равноускоренном прямолинейном движении. С помощью графика зависимости $v = v(t)$ можно определить пройденный телом путь. При равноускоренном движении скорость изменяется со временем согласно формулам

$$v = v_0 + at, \text{ если } a > 0;$$

$$v = v_0 - at, \text{ если } a < 0.$$

Как и в случае равномерного прямолинейного движения, путь, пройденный телом, равен площади фигуры, заключенной между линией графика, осью абсцисс и двумя ординатами (рис. 76, а, б).

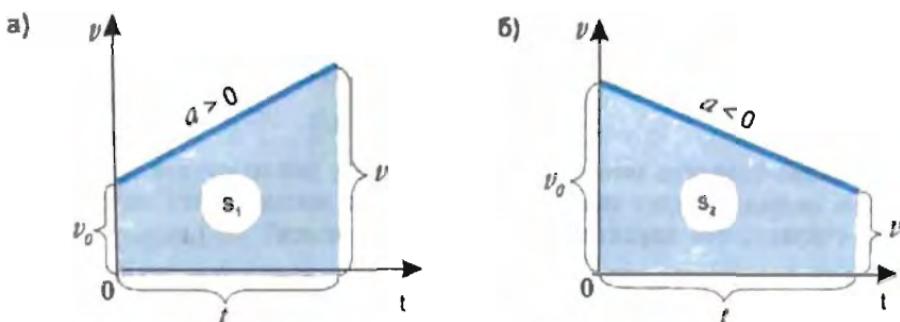


Рис. 76. Определение пути, пройденного телом, по графику зависимости $v = v(t)$

Как видно из рисунка, путь, пройденный телом, определяется площадью трапеции. Площадь трапеции равна произведению полусуммы ее оснований на высоту. В нашем случае основаниями можно считать скорости v_0 и v , высотой — время движения t . Отсюда следует, что путь, пройденный телом, можно выразить формулой

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

Применим эту формулу к графикам (см. рис. 76, а, б):

$$s_1 = \frac{v_0 + v}{2} t, \text{ но } v = v_0 + at.$$

$$\text{Значит, } s_1 = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} t = \frac{2v_0 + at}{2} t = (v_0 + at/2)t = v_0 t + at^2/2.$$

- Путь пройденный телом, определяется формулой

$$s_1 = v_0 t + at^2/2 \text{ (при } a>0).$$

$$s_2 = \frac{v_0 + v}{2} t, \text{ но } v = v_0 - at.$$

$$\text{Следовательно, } s_2 = \frac{v_0 + v_0 - at}{2} t = \frac{2v_0 - at}{2} t = (v_0 - at/2)t = v_0 t - at^2/2.$$

- Путь пройденный телом, определяется формулой

$$s_2 = v_0 t - at^2/2 \text{ (при } a<0).$$

В общем случае перемещение тела при равноускоренном движении определяется равенством



$$\boxed{s = v_0 t \pm at^2/2},$$

которое получило название *уравнение движения тела*.

Пример решения задачи

Пригородный электропоезд двигался со скоростью 18 км/ч. Увидев зеленый свет светофора, машинист увеличил скорость. Ускорение поезда при разгоне составляло 0,6 м/с². Рассчитайте путь, на котором скорость поезда увеличилась до 72 км/ч.

Анализ условия. Систему отсчета свяжем с землей (дорогой). За начало отсчета возьмем точку, в которой началось увеличение скорости. Положительное направление координатной оси OX укажем по направлению движения электропоезда. Движение тела равноускоренное ($a > 0$). Из уравнения движения тела нельзя выразить путь, поскольку неизвестно время разгона электропоезда. Поэтому необходимо воспользоваться уравнением скорости тела.

$s = ?$

$$\begin{aligned}v_0 &= 18 \text{ км/ч} = 5 \text{ м/с} \\v &= 72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с} \\a &= 0,6 \text{ м/с}^2\end{aligned}$$

Решение

Используя уравнения

$$\begin{aligned}\vec{s} &= \vec{v}_0 t + \vec{a} t^2 / 2, \\ \vec{v} &= \vec{v}_0 + \vec{a} t,\end{aligned}$$

запишем их в проекциях на координатную ось OX :

$$\begin{aligned}s &= v_0 t + at^2 / 2, \\ v &= v_0 + at.\end{aligned}$$

Из уравнения для расчета скорости тела выразим время движения $t = \frac{v - v_0}{a}$ и подставим его в уравнение для расчета пути:

$$\begin{aligned}s &= v_0(v - v_0)/a + a/2 \cdot [(v - v_0)/a]^2 = (v_0v - v_0^2)/a + a/2 \times \\&\times (v^2 - 2vv_0 + v_0^2)/a^2 = (v_0v - v_0^2)/a + (v^2 - 2vv_0 + v_0^2)/2a = \\&= (2v_0v - 2v_0^2 + v^2 - 2vv_0 + v_0^2)/2a = (v^2 - v_0^2)/2a.\end{aligned}$$

Итак, расчетную формулу пути запишем так:

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

Подставляя в формулу единицы входящих в нее величин, проверим единицу пути:

$$[s] = (\text{м}^2/\text{с}^2 - \text{м}^2/\text{с}^2) / (\text{м}/\text{с}^2) = (\text{м}^2/\text{с}^2) / (\text{м}/\text{с}^2) = \text{м}^2\text{с}^2/\text{с}^2\text{м} = (\text{м}).$$

Подсчитаем путь, на котором произошло увеличение скорости:

$$s = (400 - 25)/2 \cdot 0,6 = 375/1,2 = 312,5 \text{ (м)}.$$

Ответ: $s = 312,5$ м.

Нами получена формула, которую будем использовать в дальнейшем при решении задач:

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

Преобразуем ее: $v^2 - v_0^2 = 2as$.

В общем случае формула взаимосвязи скоростей, ускорения тела и пройденного пути определяется следующим равенством:



$$v^2 - v_0^2 = 2\vec{a} \cdot \vec{s}.$$

Координата при равноускоренном прямолинейном движении. Вы знаете, что путь равен изменению координаты тела: $s = x - x_0$. Значит, $x = x_0 + s$.

Учитывая уравнение для расчета пуги, получаем формулу расчета координаты тела (материальной точки) при равноускоренном прямолинейном движении:



$$x = x_0 + v_0 t \pm at^2/2.$$

Для вычисления координаты тела в любой момент времени t нужно знать начальную координату тела, начальную скорость и ускорение.

Пример решения задачи

Движения тел по шоссе заданы уравнениями: а) велосипедиста $x = -0,4t^2$, м; б) грузового автомобиля $x = -200 + 16t - 1,5t^2$, м; в) пешехода $x = 800 - 0,6t$, м; г) бензовоза $x = -150$ м. Опишите движения тел, ответив на следующие вопросы: 1) Из какой точки движетсяся тело? 2) В какую сторону оно движется? 3) С какой начальной скоростью движется тело? 4) С каким ускорением оно движется? 5) Каков характер движения тела?

Решение

Сравнив уравнения для координаты в общем виде $x = x_0 \pm v_0 t$ и $x = x_0 + v_0 t \pm at^2/2$ с уравнениями движений тел, получаем:

а) Велосипедист движется из состояния покоя ($v_0 = 0$) с ускорением $0,8 \text{ м/с}^2$ в направлении, противоположном положительному направлению координатной оси. Начало движения совпадает с точкой отсчета ($x_0 = 0$).

б) Грузовой автомобиль движется из точки с координатой $x_0 = -200$ м, имея начальную скорость $v_0 = 16$ м/с. Движение автомобиля равноускоренное ($a = 3 \text{ м/с}^2$) в направлении, противоположном положительному направлению координатной оси.

в) Пешеход движется из точки с координатой $x_0 = 800$ м равномерно со скоростью $v = 0,6$ м/с ($v = \text{const}$) в направлении, противоположном положительному направлению координатной оси.

г) Бензовоз поконится в точке с координатой $x = -150$ м.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Приборы и материалы: металлический желоб, стальной шарик, секундомер (механический или электронный), штатив с принадлежностями, металлический цилиндр, измерительная лента, кусочек мела.

Экспериментальная установка изображена на рисунке 77.

Для измерения ускорения, с которым скатывается шарик по наклонному желобу, воспользуемся формулой для расчета пути при равноускоренном движении $s = v_0 t + at^2/2$. Поскольку шарик начинает двигаться из состояния покоя, то $v_0 = 0$ и $s = at^2/2$. Следовательно, ускорение можно вычислить по формуле

$$a = 2s/t^2.$$

◆ 1. Поместите шарик на желобе так, как показано на рисунке 77. Отметьте мелом на желобе положения шарика и цилиндра.

2. Когда стрелка секундомера совпадет с нулевым (или другим целым) делением (или индикатор электронных часов покажет «0»), отпустите шарик и запишите время t его движения до удара о цилиндр.

3. С помощью измерительной ленты измерьте пройденный шариком путь s вдоль желоба.

4. Подставьте числовые значения s и t в формулу для расчета модуля ускорения.

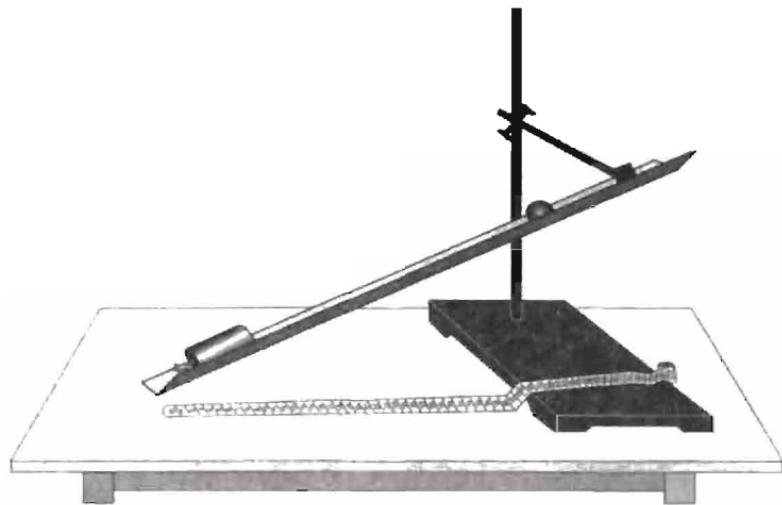


Рис. 77

5. Повторите опыт 5–6 раз, меняя положение шарика на желобе, и для каждого случая рассчитайте ускорение. Затем подсчитайте среднее арифметическое значение ускорения по формуле

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n},$$

где n — число измерений.

6. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| № опыта | $s, \text{ м}$ | $t, \text{ с}$ | $a, \text{ м/с}^2$ | $a_{\text{ср}}, \text{ м/с}^2$ |
|---------|----------------|----------------|--------------------|--------------------------------|
| | | | | |

* 7. Измерьте ускорение тела при другом угле наклона желоба. Сравните с результатами, полученными ранее.

● 1. Приведенные на рисунке 78 графики показывают зависимость скорости движения тела от времени $v = v(t)$ для четырех тел. Опишите движение каждого тела.

2. На рисунке 79 приведен график зависимости скорости движения тела от времени $v = v(t)$. С помощью графика выполните следующие задания: 1) Опишите движение тела на каждом участке. 2) Определите ускорение тела на каждом участке движения. 3) Постройте график зависимости ускорения тела от времени $a = a(t)$. Масштаб выберите самостоятельно. 4) Налишите урав-

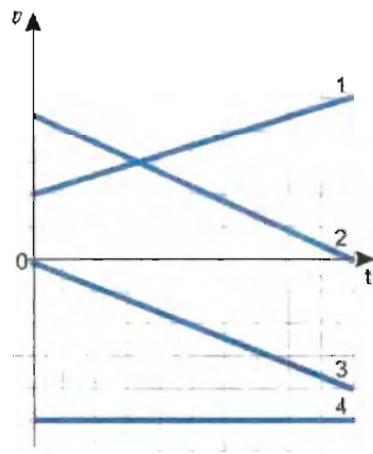


Рис. 78

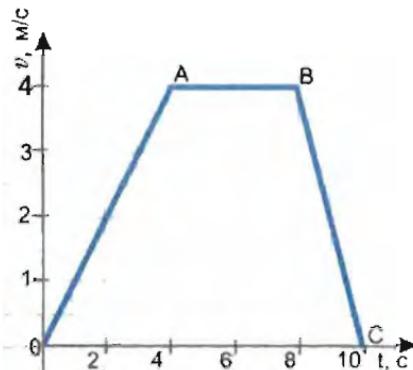


Рис. 79

нение зависимости скорости тела от времени $v = v(t)$ для каждого участка.

3. На рисунке 80 приведен график зависимости ускорения тела от времени $a = a(t)$. С помощью графика выполните следующие задания: 1) Определите характер движения тела на каждом участке (I, II и III). 2) Постройте график зависимости скорости тела от времени $v = v(t)$. Масштаб выберите самостоятельно.

* 4. На рисунке 81 приведены графики зависимости скорости от времени $v = v(t)$ для трех тел. С помощью графиков выполните следующие задания: 1) Рассчитайте ускорения тел. 2) В одной системе координат начертите графики зависимости ускорения от времени $a = a(t)$ для трех тел. Масштаб выберите самостоятельно. 3) Напишите уравнения зависимости скорости от времени $v = v(t)$ и пути от времени $s = s(t)$ для каждого из тел.

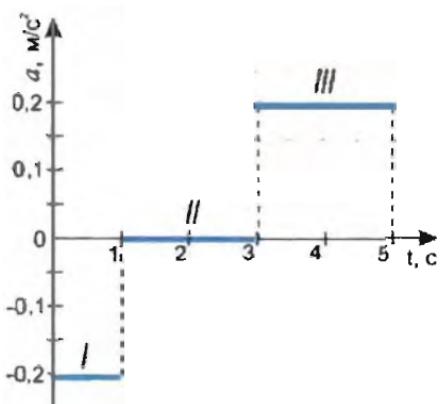


Рис. 80

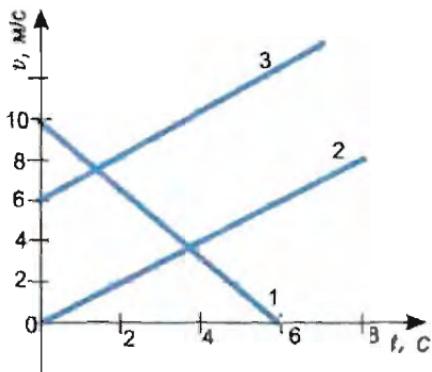
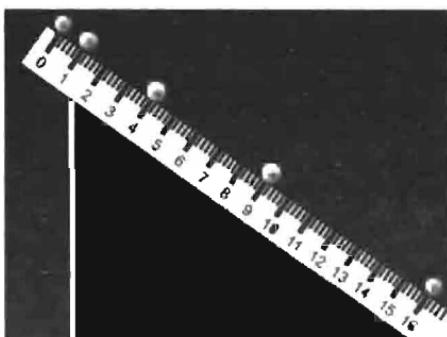


Рис. 81



■ 1. С горы длиной 60 м санки скатались за 10 с. С каким ускорением двигались санки? Какую скорость они приобрели в конце горы?

2. На рисунке 82 приведена стробоскопическая фотография движения шарика по желобу. Известно, что промежутки времени между двумя последовательными вспышками равны 0,2 с. На шкале указаны деления в дециметрах. С каким ускорением двигался шарик? Какие скорости он имел в положениях, зафиксированных на фотографии?

3. Легковой автомобиль, имея скорость 50 км/ч, движется с ус-

Рис. 82

корением $0,18 \text{ м/с}^2$. Чему равнялся бы тормозной путь при его аварийной остановке?

4. Троллейбус, трогаясь с места от остановки с ускорением $0,8 \text{ м/с}^2$, прошел путь 50 м . Какую скорость он приобретет в конце этого пути?

5. Движение тела задано уравнением $x = 20 + 5t - 2 t^2$, м. Напишите уравнение зависимости скорости тела от времени $v = v(t)$. Рассчитайте координату и скорость тела через 2 с и 10 с от начала движения.

§ 12. ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Криволинейное движение. Когда вы пишете ручкой или карандашом на листе бумаги, то их кончик движется по кривым линиям. Если вы бросаете камень в реку, то он движется также по кривой линии. С криволинейным движением мы встречаемся чаще, чем с прямолинейным.

С детства мы наблюдаем различные виды криволинейного движения, например вращательное движение. Кто из нас не катался на карусели или колесе обозрения, не наблюдал за вращением колеса или волчка, стрелок механических часов, лопастей вентилятора, винта вертолета и т. д.! Все точки вращающихся тел, за исключением оси, описывают окружности.

Во вращательном движении участвуют и космические тела: планеты движутся вокруг Солнца; спутники планет — вокруг планет; все планеты, звезды, Солнце и Земля также вращаются вокруг своей оси. У звезд скорости вращения различны. Некоторые звезды вращаются со скоростью $200\text{--}300 \text{ км/с}$ (на экваторе), скорость вращения Солнца на экваторе составляет около 2 км/с . Все звезды Галактики обращаются вокруг ее центра. Звезды, составляющие галактический диск, обращаются вокруг ядра Галактики в одну и ту же сторону по орбитам, близким к круговым.

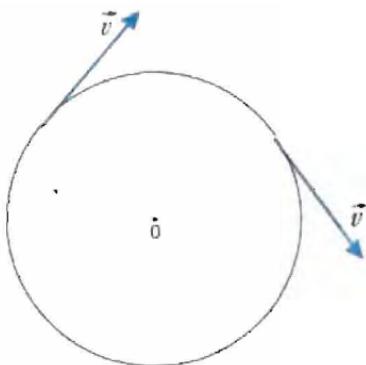
Движение тела по окружности. Среди разнообразных криволинейных движений наиболее простым является движение какого-либо тела по окружности с постоянной по модулю скоростью. Таким телом, вращающимся с постоянной скоростью вокруг неподвижной оси, могут быть точильный круг, колесо автомобиля, молот или диск в руках спортсмена, винт самолета и т. д.

Мгновенная скорость движения тела в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной к траектории в этой точке. В этом можно убедиться, если прижать к врашающемуся точильному камню конец детали (рис. 83). По касательной к окружности движутся и брызги от колес буксующего автомобиля (рис. 84). Когда спортсмен вращает молот по окружности, то направление мгновенной скорости также направлено по касательной к траектории (рис. 85).

На рисунке 86, а, б приведены стrobоскопические фотографии движения тела по окружности; при этом тело за любые равные промежутки времени описывает равные дуги. При движении



а)



б)

Рис. 83. Вращение точильного камня: а) направление вылета раскаленных частиц, отрывающихся от точильного круга; б) направление мгновенной скорости

тела по окружности в любой точке траектории модуль мгновенной скорости остается постоянным ($v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = \dots = v_n = \dots = \text{const}$), но меняется направление от точки к точке (рис. 87). В случае движения тела (материальной точки) по окружности мгновенную скорость называют *линейной скоростью*. Так, линейная скорость рабочей поверхности точильного круга может равняться 100 м/с. Расчеты показывают, что линейная скорость точки земного экватора равна 465,1 м/с.

Характеристики движения тела по окружности. Для характеристики движения тела (материальной точки) по окружности вводятся специальные величины: частота и период обращения, угловая скорость.

Частотой обращения называется величина, численно равная числу оборотов, совершаемых телом (материальной точкой) за единицу времени.

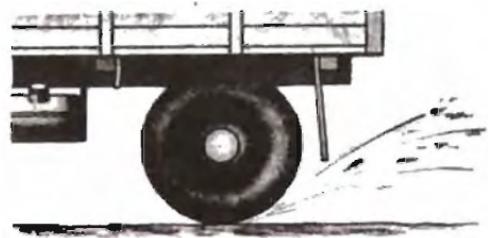
Частота обращения обозначается буквой греческого алфавита ν (читается «ню») и рассчитывается по формуле

:

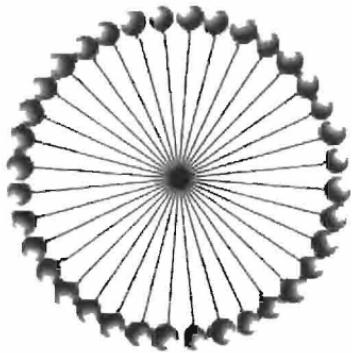
$$\nu = n/t,$$

где n — число оборотов, совершаемых телом (материальной точкой) за время t ; t — время обращения.

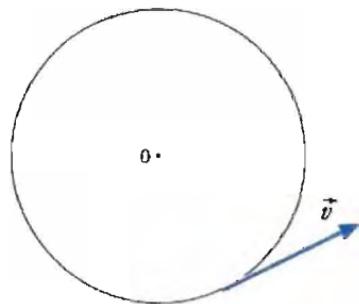
За единицу частоты в Международной системе единиц (СИ) принят оборот в секунду. Его сокращенное обозначение $1/\text{с}$: $[\nu] = 1/\text{с} = \text{с}^{-1}$.



а)



а)



б)

Рис. 84. Вращение колеса буксующего автомобиля: а) направление вылета брызг; б) направление мгновенной скорости

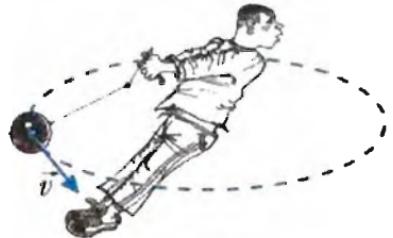
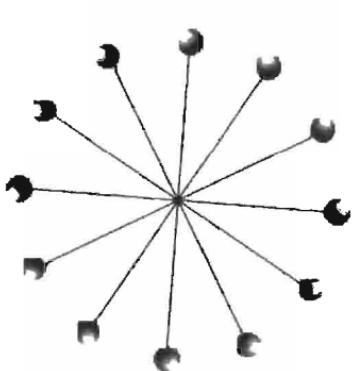


Рис. 85



б)

Рис. 86. Стробоскопические фотографии движения тела по окружности

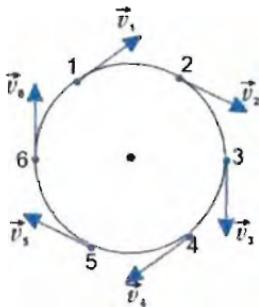


Рис. 87. Направление линейной скорости при движении тела по окружности

Периодом обращения называется промежуток времени, в течение которого тело (материальная точка) совершает один полный оборот по окружности.

Период обозначается буквой латинского алфавита T (читается «тэ») и рассчитывается по формуле

$$T = t/n.$$

За единицу периода в Международной системе единиц (СИ) принята секунда: [7] = с.

Сравнивая формулы для расчета частоты и периода обращения, можно заметить, что они взаимно обратные:

$$T = 1/v, v = 1/T.$$

Периоды обращения планет Солнечной системы и их спутников рассчитаны достаточно точно. Так, период обращения Земли вокруг Солнца равен 365,26 сут, период обращения Луны вокруг Земли составляет 27 сут 7 ч 43 мин 11,5 с. В таблице 6 приведены периоды обращения планет Солнечной системы вокруг Солнца и вращения вокруг оси. Период обращения Солнца по орбите вокруг центра Галактики оценивается в 200 млн лет. Земля делает полный оборот вокруг оси за 23 ч 56 мин — на 4 мин короче суток.

Таблица 6
Периоды обращения планет Солнечной системы

| Планета | Период обращения вокруг Солнца | Период вращения вокруг оси |
|----------|--------------------------------|----------------------------|
| Меркурий | 88 сут | 58,6 сут |
| Венера | 224,7 сут | 243 сут |
| Марс | 686,98 сут | 24 ч 37 мин |
| Юпитер | 11,86 года | 9 ч 55 мин |
| Сатурн | 29,5 года | 10 ч 40 мин |
| Уран | 84,01 года | 17 ч 14,4 мин |
| Нептун | 164,79 лет | 16 ч 03 мин |
| Плутон | 247,7 года | 6,39 сут |

При движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью можно определить его линейную скорость по формуле

ле $v = s/t$. За один оборот ($t = T$) тело пройдет расстояние, равное длине окружности: $s = 2\pi R$ (где R – радиус окружности). Следовательно, формула для расчета линейной скорости

$$v = 2\pi R/T.$$

Так как $T = 1/v$, то

$$v = 2\pi Rv.$$

Предположим, что тело (материальная точка) движется по окружности с постоянной по модулю линейной скоростью и в момент времени t , находится в положении 1, а в момент времени t_2 – в положении 2 (рис. 88). Радиус R , проведенный из центра окружности к телу (материальной точке), за это время описывает угол ϕ , который называется угловым перемещением. Угловое перемещение в Международной системе единиц (СИ) выражается в радианах (сокращенно рад). Радиан – центральный угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу. Из курса математики известно, что 1 рад $\approx 57^\circ 18'$. Угол 360° (полная окружность) содержит 2π радиан.

Отношение углового перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение совершено, называется угловой скоростью. Угловая скорость обозначается буквой греческого алфавита ω (читается «омега»).

Тогда по определению

$$\omega = \phi/t.$$

За единицу угловой скорости в СИ принят радиан в секунду. Его сокращенное обозначение рад/с.

$$[\omega] = \text{рад/с} = 1/\text{с} = \text{с}^{-1}.$$

Движение, при котором тело (материальная точка) движется по окружности с постоянной угловой скоростью, называют равномерным движением по окружности.

• Движение по окружности происходит с постоянной угловой скоростью ($\omega = \text{const}$); модуль линейной скорости остается постоянным, направление же линейной скорости меняется от точки к точке.

Угловое перемещение ϕ тела (материальной точки) за период T равно 2π .

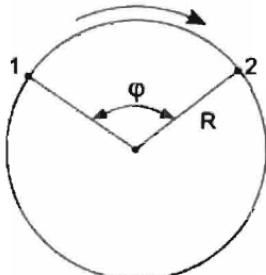


Рис. 88

Поэтому формула для расчета угловой скорости

$$\omega = 2\pi/T,$$

или, учитывая, что $T = 1/v$,

$$\omega = 2\pi v.$$

Найдем отношение линейной скорости к угловой скорости:

$$\frac{v}{\omega} = \frac{2\pi R v}{2\pi v} = R.$$

Отсюда

$$v = \omega R.$$

Ускорение при движении тела по окружности. Пусть тело (материальная точка) движется по окружности радиусом R с постоянной по модулю линейной скоростью ($v_1 = v_2 = \dots = \text{const}$). За время $\Delta t = t_2 - t_1$ тело перейдет из положения 1 в положение 2 (рис. 89). При этом радиус повернется на угол ϕ . В положении 1 скорость тела \vec{v}_1 , в положении 2 скорость \vec{v}_2 , перемещение за время Δt равно \vec{s} . Во время движения модуль линейной скорости не меняется, а направление скорости всегда меняется. Следовательно, *движение тела по окружности с постоянной по модулю линейной скоростью — движение с ускорением, которое характеризует быстроту изменения направления скорости* ($\vec{a} \neq 0$).

Как направлено ускорение? По определению ускорение можно вычислить так:

$$\vec{a} = (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)/\Delta t = \Delta \vec{v}/\Delta t.$$

Найдем вектор $\Delta \vec{v} = (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$, для чего перенесем вектор \vec{v}_2 в положение 1 параллельно самому себе и соединим конец вычитаемого вектора \vec{v}_1 с концом уменьшаемого вектора \vec{v}_2 . Вектор $\Delta \vec{v}$ направлен внутрь окружности. Но нам необходимо найти не среднее ускорение за время Δt , а мгновенное ускорение в положении 1. Поступим так же, как и

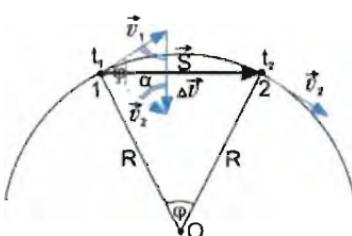


Рис. 89

при введении мгновенной скорости, т. е. будем рассматривать среднее ускорение $a_{cp} = \Delta v / \Delta t$ за все меньшее время ($\Delta t \rightarrow 0$). Тогда ускорение тела в положении 1 будет направлено так же, как и усредненное за малое время, т. е. так же, как и вектор $\Delta \vec{v}$ при $\Delta t \rightarrow 0$. Если время уменьшается ($\Delta t \rightarrow 0$), то положение 2 приближается к положению 1, радиус $O2$ приближается к радиусу $O1$ и угол ϕ между ними уменьшается и стремится к нулю ($\phi \rightarrow 0$). Угол между векторами \vec{v}_1 и \vec{v}_2 с вершиной в положении 1 равен углу ϕ между радиусами (углы со взаимно перпендикулярными сторонами: $v_1 \perp O1$, $v_2 \perp O2$). Следовательно, угол ϕ в маленьком треугольнике стремится к нулю. Так как этот треугольник равнобедренный, его углы α при основании равны. Значит, угол ϕ при вершине этого треугольника стремится к 180° , а каждый из них — к 90° . Следовательно, угол между векторами \vec{v}_1 и $\Delta \vec{v}$ (при $\Delta t \rightarrow 0$) будет близок к 90° , т. е. $\Delta \vec{v} \perp \vec{v}_1$. Иначе, **вектор ускорения перпендикулярен вектору линейной скорости, с которой тело (материальная точка) движется по окружности** ($\vec{a} \perp \vec{v}$).

Ускорение при движении тела (материальной точки) по окружности с постоянной по модулю скоростью перпендикулярно скорости, т. е. направлено к центру (по нормали), и называется нормальным (или центростремительным) ускорением.

Нормальное ускорение обозначается a_n . Выведем формулу для расчета нормального ускорения. Поскольку модуль ускорения рассчитывается по формуле $a = \Delta v / \Delta t$, то задача сводится к определению модуля изменения скорости Δv . Δv — основание треугольника $1v_1v_2$ (см. рис. 89). Этот треугольник подобен треугольнику $O12$. Они подобны, так как углы при вершинах у них равны. Сходственные стороны треугольников пропорциональны, поэтому запишем: $\Delta v / s = v_1 / R$, или $\Delta v = v_1 s / R$. Подставив последнее уравнение в формулу ускорения, получаем $a = v_1 s / R \Delta t$. Но отношение $s / \Delta t$ за очень малое время ($\Delta t \rightarrow 0$) — значение модуля скорости в положении 1, т. е. мгновенная скорость v_1 . Так как модуль скорости постоянен, то скорость обозначим просто v .

Тогда модуль нормального ускорения будет определяться по формуле

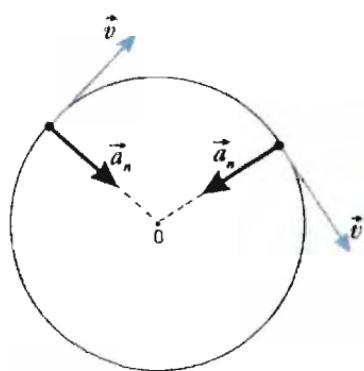


Рис. 90



$$a_n = v^2 / R.$$

$$[a_n] = \frac{M^2}{C^2 \cdot M} = M/C^2.$$

Учитывая соотношение между линейной и угловой скоростями $v = \omega R$, получаем $a_n = \omega^2 R^2 / R = \omega^2 R$.



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

Вектор нормального ускорения в любой момент движения тела (материальной точки) перпендикулярен вектору скорости и направлен по радиусу к центру окружности, которую описывает тело (рис. 90).

Примеры решения задач

Задача 1. Автомобиль движется с постоянной скоростью 72 км/ч по треку диаметром 1,6 км. Чему равны угловая скорость и период движения? Период выразите в минутах.

$$\omega = ? \quad T = ?$$

$$\begin{aligned} v &= 72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с} \\ d &= 1,6 \text{ км} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ м} \\ R &= 0,8 \text{ км} = 800 \text{ м} \end{aligned}$$

Решение

$$v = \omega R \Rightarrow \omega = v/R,$$

$$[\omega] = \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}} = 1/\text{с},$$

$$\begin{aligned} \omega &= 20/800 = 0,025 \text{ (1/с)} = \\ &= 25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

$$\omega = 2\pi/T \Rightarrow T = 2\pi/\omega,$$

$$[T] = \text{рад/рад/с} = \text{с}.$$

$$\begin{aligned} T &= 2\pi/25 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 3,14/25 \cdot 10^{-3} = \\ &= 6,28/25 \cdot 10^{-3} \approx 0,25 \cdot 10^3 \approx 250 \text{ (с)} \approx \\ &\approx 4,2 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Ответ: угловая скорость движения автомобиля по треку равна $0,025 \text{ с}^{-1}$, период движения — 4,2 мин.

*** Задача 2.** Земля движется вокруг Солнца по орбите, близкой к круговой. Расстояние между Солнцем и Землей принимается за 1 а.е. ≈ 150 млн км. Период обращения Земли вокруг Солнца равен 365,26 сут. Рассчитайте линейную и угловую скорости движения Земли. Чему равно нормальное ускорение Земли, возникающее при движении ее вокруг Солнца? Что означает полученный результат для нормального ускорения?

$$v = ? \quad \omega = ? \quad a_n = ?$$

$$\begin{aligned} R &= 150 \text{ млн км} = 15 \cdot 10^{10} \text{ м} \\ T &= 365,26 \text{ сут} \approx 3,16 \cdot 10^7 \text{ с} \end{aligned}$$

Решение

Выполним преобразования для периода обращения, учитывая, что 1 сут = 24 ч, 1 ч = 60 мин, 1 мин = 60 с.

$$v = 2\pi R/T,$$

$$v = 2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 10^{10} / 3,16 \cdot 10^7 \approx 29,8 \cdot 10^3 \text{ (м/с)} \approx 30 \text{ км/с.}$$

Сравним полученный результат с табличными данными (см. табл. 5, с. 60):

$$v = \omega R \Rightarrow \omega = v/R,$$

$$\omega = 30 \cdot 10^3 / 15 \cdot 10^{10} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ (1/c), или } \omega \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1},$$

$$a_n = \omega^2 R,$$

$$a_n = (2 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 15 \cdot 10^{10} \approx 4 \cdot 10^{-14} \cdot 15 \cdot 10^{10} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ (м/c}^2\text{).}$$

Нормальное ускорение показывает, что направление линейной скорости при движении Земли вокруг Солнца меняется со скоростью 0,006 м/с за 1 с.

Ответ: линейная скорость движения Земли по круговой орбите составляет около 30 км/с, угловая скорость равна $2 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$, нормальное ускорение – $6 \cdot 10^{-3} \text{ м/c}^2$.

? 1. Как называется линия, вдоль которой движется тело при своем движении? 2. В каком случае движение считается криволинейным? Приведите примеры криволинейных движений тела (желательно не называемых в параграфе). 3. Как направлена линейная скорость при движении тела (материальной точки) по окружности? 4. Что понимают под частотой обращения? периодом обращения? 5. Какая связь между частотой и периодом обращения? 6. Запишите формулы связи линейной скорости движения с частотой и периодом обращения. 7. Какое движение называется равномерным движением по окружности? Какая величина остается постоянной при этом? 8. Что характеризует нормальное (центростремительное) ускорение? Как оно направлено?

● 1. Используя данные таблицы 6(с. 77), выполните следующие задания: 1) Сравните периоды обращения планет Солнечной системы вокруг Солнца (у какой планеты наибольший период, у какой наименьший). 2) Назовите планету с наименьшим и наибольшим периодом вращения вокруг оси.

2. Диск вращается равномерно по часовой стрелке вокруг оси O (рис. 91). Линейная скорость точки A равна 0,12 м/с. 1) Укажите направление и модуль линейной скорости в точке A диска. Масштаб выберите самостоятельно. 2) Рассчитайте значение нормального (центростремительного) ускорения для точки A . 3) Укажите направление и модуль нормального (центростремительного) ускорения. Масштаб выберите самостоятельно. 4) Можно ли утверждать, что линейная скорость точек A и B одинакова? Ответ обоснуйте.

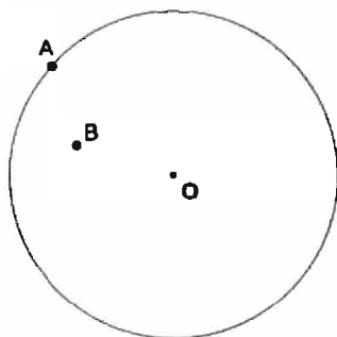


Рис. 91

■ 1. Мотоциклист движется по закруглению дороги радиусом 80 м. Нормальное (центробежное) ускорение составляет 2 м/с^2 . Рассчитайте линейную скорость движения мотоциклиста. Выразите скорость: в м/с и км/ч.

2. Современные часы с боем на Спасской башне Московского Кремля (кремлевские куранты) изготовлены в 1851 г. Длина часовой стрелки равна 2,97 м, а минутной – 3,27 м. Линейная скорость конца минутной стрелки равна 0,006 м/с. Рассчитайте нормальное (центробежное) ускорение конца минутной стрелки, а также период ее обращения.

3. Нормальное (центробежное) ускорение точки земной поверхности на широте Москвы составляет $1,9 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$. Радиус Земли равен 6400 км. Рассчитайте линейную скорость этой точки земной поверхности. Выразите скорость: в м/с и км/ч.

4. Частота вращения лопасти настольного вентилятора равна 20 с^{-1} , а линейная скорость конца лопасти – 18,3 м/с. Рассчитайте период вращения лопастей вентилятора, радиус вращения и нормальное (центробежное) ускорение конца лопасти.

ГЛАВА II. ДИНАМИКА

Наука представляет собой внутреннее единое целое.

M. Планк

§ 13. ПРИЧИНЫ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ. ИНЕРЦИЯ. МАССА

Принцип причинности. До сих пор мы изучали движение тел (материальных точек) только кинематически. Мы определяли основные кинематические характеристики движения — скорость, ускорение, перемещение, путь и координату тела, устанавливали их взаимосвязь.

Связь между отдельными состояниями тел, явлениями, формами материи в процессах ее движения и развития называется *причинностью*. Возникновение любых объектов, систем и изменение их свойств с течением времени имеют свои основания в предшествующих состояниях материи; эти основания называются *причинами*, а вызываемые ими изменения — *следствиями*. В классической механике состояние системы определяется положениями \vec{z} (x , y , z) и скоростями \vec{v} тел. С течением времени состояние системы может изменяться: меняется взаимное расположение тел системы, изменяются их скорости. Однако между начальным и последующим состояниями системы существуют *причинно-следственные связи*. Это означает, что если мы знаем положение (координату) тела, а также его скорость и ускорение в заданный момент времени, то мы можем определить его положение в любой другой момент времени. «Будущее не влияет на прошлое», «событие-причина предшествует по времени событию-следствию» — в этом суть *принципа причинности* — одного из общих принципов, устанавливающих допустимые пределы влияния событий друг на друга. В классической механике, если известен закон взаимодействия между телами, — это совокупность начальных положений и скоростей всех тел системы, полностью определяющих все ее дальнейшее движение. *Принцип причинности* — это обобщение множества опытных фактов и *одна из аксиом классической механики*. (Аксиома от греч. αχίута — исходное положение какой-либо науки, теории, принимаемое без доказательств.)

Уравнения кинематики позволяют решать сложные задачи движения различных частей машин и механизмов, рассчитывать траектории движущихся тел, например самолетов, ракет, артиллерийских снарядов, и многое другое. Однако кинематика может только описать движение, пользуясь заданными наперед его характеристиками (скоростью, ускорением), но не отвечает на вопрос о причинах возникновения движения, изменения скорости и возникновения ускорения. Изучением этих причин занимается другой раздел механики, который называется *динамикой* (от греч. *dynamis* — сила).

Причины движения тел. Вопрос о причинах, вызывающих движение различных тел, его изменение со временем, является главным не только в механике и физике, но и в нашем мировоззрении вообще. Без ответа на этот вопрос невозможно не только создавать современные машины и механизмы, но понять и объяснить движение небесных тел, смену дня и ночи, времен года, возникновение ураганов и землетрясений, само проявление жизни на Земле.

На первый взгляд повседневный опыт просто отвечает на вопрос о причинах движения тела. Чтобы передвигать тачку (или тележку) с постоянной скоростью по горизонтальной дороге, необходимо приложить определенное усилие. Перестали толкать тачку — она остановилась, начали опять толкать — она стала двигаться.

На основании подобных наблюдений Аристотель сформулировал общий принцип: «природа боится пустоты», т. е. все пространство вокруг заполнено материей, которая препятствует или оказывает сопротивление всякому движению тела. Отсюда он пришел к выводу, что для движения тела с постоянной скоростью необходимо приложить силу. Прекращается действие силы — прекращается движение. Поскольку Аристотель пользовался авторитетом, то это неправильное понимание причин движения являлось основной доктриной механики в течение почти двух тысяч лет.

Только в XVI в. итальянский ученый Галилео Галилей впервые на основе проведения физических опытов экспериментально доказал несостоятельность утверждений Аристотеля. Он показал, что под действием постоянной силы любое свободное тело движется не равномерно, а равноускоренно и что «любая скорость, сообщенная телу, устойчиво сохраняется до тех пор, пока нет причин к возникновению торможения или ускорения».

В отличие от Аристотеля Галилей утверждал, что тело сопротивляется не движению с постоянной скоростью, а ускорению, т. е. изменению этой скорости. При этом он понимал, что причинами возникновения торможения или ускорения тела могут быть только взаимодействия данного тела с другими телами. Поэтому, чтобы наблюдать в чистом виде прямолинейное движение с постоянной скоростью, необходимо это тело изолировать от влияния всех других окружающих тел. Понятно, что осуществить это практически невозможно. Во-первых, все опыты мы проводим на Земле, которая влияет на тело — тело притягивается к Земле (т. е. «падает» на Землю), во-вторых, мы принципиально не можем убрать все окружающие тела.

Как же быть в этой ситуации? С одной стороны, действия некоторых тел на наше изучаемое тело (пробное тело) можно скомпенсировать или уравновесить. Например, если положить шарик на стол, то шарик будет взаимодействовать как с Землей, так и со столом. Одновременное действие Земли и стола уравновешивает их, и шарик находится в покое. С другой стороны,

можно рассматривать особенности движения тела только по горизонтали и исключить тем самым влияние Земли и опоры (стола), которые действуют по вертикали. Далее путем последовательных экспериментов необходимо убедиться, что действие окружающих тел (расстановка мебели в комнате, расположение приборов на столе и др.) не оказывает заметного влияния на состояние нашего тела. После этого, изменения условия эксперимента, можно свести действия тел, с которыми взаимодействует наше тело, к минимуму. Подобные опыты проводил и Галилей. Возьмем твердый полированный шарик (пробное тело) и будем спускать его с горки строго определенной высоты h (рис. 92). Под горкой горизонтально установим желоб в первом случае заполненный песком, во втором случае — обклеенный ворсистой тканью и в третьем случае изготовленный из полированного стекла. Что мы будем наблюдать? Эксперимент показывает, что желоб оказывает на шарик в горизонтальном направлении различное действие. В первом случае шарик, попав в песок, быстро останавливается и оставляет в песке заметный след (рис. 92, а).

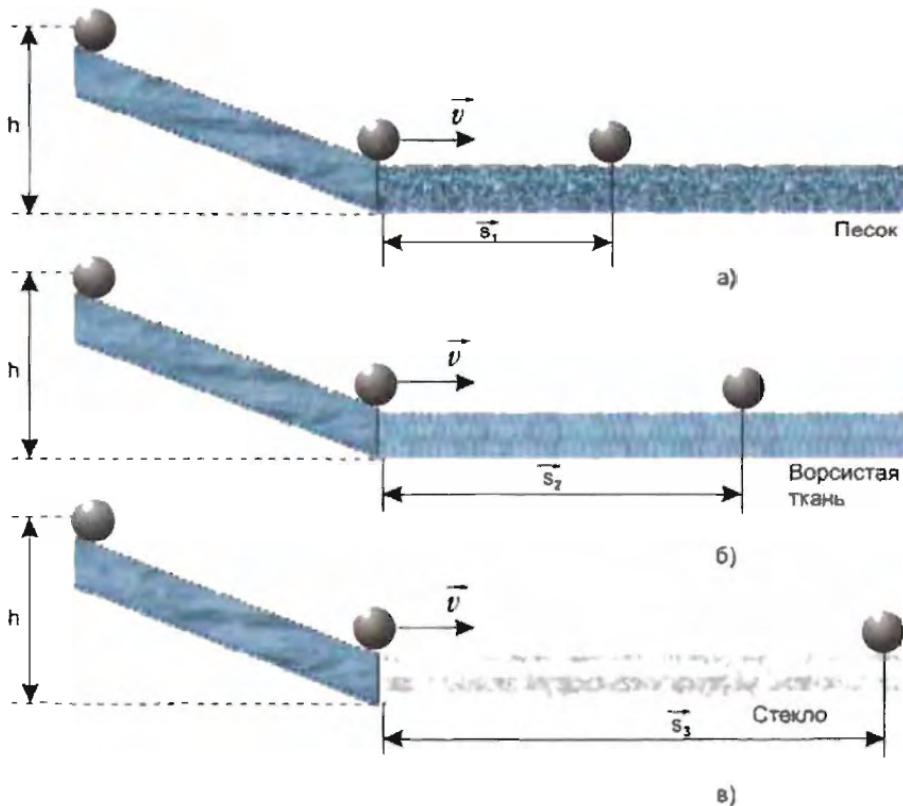


Рис. 92. Влияние состояния поверхности на движение шарика

При этом он перемещается на \vec{s}_1 . Во втором случае скорость изменяется заметно меньше и шарик перемещается на \vec{s}_2 (рис. 92, б). В третьем случае шарик будет двигаться до конца желоба почти с постоянной скоростью и совершил перемещение \vec{s}_3 (рис. 92, в).

Таким образом, эксперимент позволяет сделать вывод о том, что при непрерывном уменьшении влияния окружающих тел движение по горизонтальному направлению будет стремиться к равномерному и прямолинейному движению.

Инерция. Инертность. Движение тел, которое происходит без действия на него других тел, называют движением по инерции (от лат. *inertia* – неподвижность, бездействие).

Движение по инерции мы часто наблюдаем в повседневной жизни. Наглядным примером такого движения является движение вагонов по горизонтальным рельсам после спуска с распределительной горки. Электровоз сообщает вагонам небольшую начальную скорость, а далее вагоны по инерции движутся по рельсам (рис. 93, а). Переключением распределительных стрелок вагоны направляются по различным путям. Остановить такой вагон непросто. Поэтому в конце пути устанавливают специальные тормозные башмаки, которые создают очень большое трение о рельсы, в результате чего вагон останавливается (рис. 93, б).

Аналогичная картина возникает, когда реактивный самолет при выключенном двигателе с большой скоростью совершает посадку на аэродром. Чтобы преодолеть движение по инерции, лет-

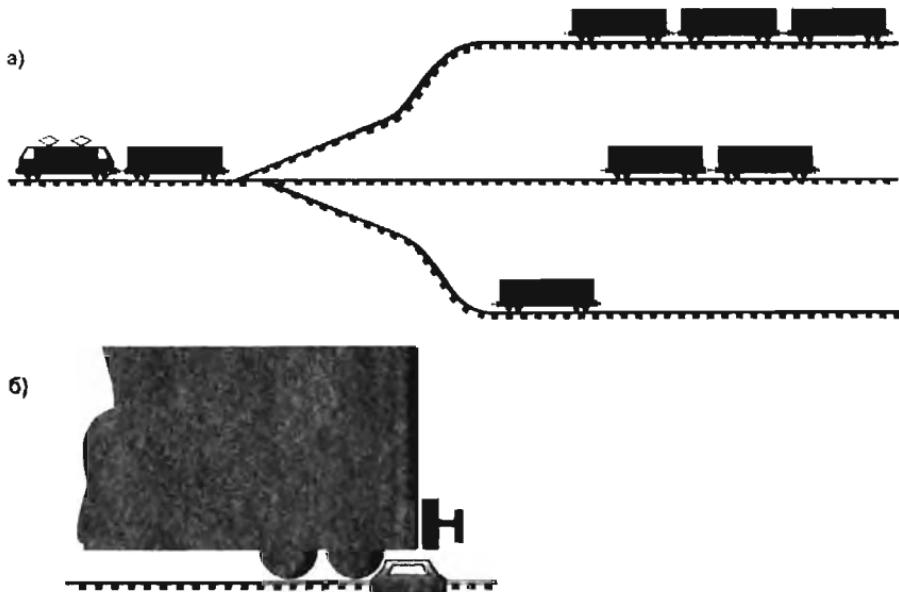


Рис. 93. Движение вагонов по распределительной горке

чик выбрасывает специальный тормозной парашют. За счет взаимодействия парашюта с потоком воздуха скорость самолета уменьшается.

Водитель автомобиля и машинист поезда знают о том, что для погашения скорости движения по инерции необходимо какое-то время. Поэтому переходить дорогу перед движущимся транспортом опасно, так как машина не может мгновенно остановиться при торможении (обоснование этому факту дадим в § 23).

Явление сохранения скорости тела при отсутствии действия на него других тел называется инерцией.

Свойство тел, проявляющееся в том, что скорость их движения остается неизменной до тех пор, пока на них не действуют другие тела, называется инертностью. В процессе же взаимодействия скорость тел не может измениться мгновенно, а изменяется постепенно.

Масса. Чем больше время изменения скорости, тем инертнее тело. Из двух взаимодействующих тел инертность больше у того тела, которое в результате взаимодействия приобретает меньшее ускорение.



Рис. 94. Взаимодействие шариков



Рис. 95. Взаимодействие цилиндров

◆ 1. Подвесьте на нитях два стальных шарика (большой и маленький) так, как показано на рисунке 94. Отклоните шарики в противоположные стороны от положения равновесия на одинаковый угол и отпустите. Как будут двигаться шарики после соударения?

2. Подвесьте на нитях металлические цилиндры (алюминиевый и железный) так, как показано на рисунке 95. Отклоните цилиндры в противоположные стороны на одинаковый угол и отпустите. Как будут двигаться цилиндры после взаимодействия?

3. Сделайте вывод по результатам экспериментов.

Масса выражает собственное свойство (инертность) тела, не зависящее ни от того, в каких взаимодействиях тело участвует, ни от того, как оно движется. **Масса – количественная мера инертности тел.**

Масса – скалярная величина; она не имеет направления и задается числом.

Из курса естествознания вы знаете, что масса обозначается буквой латинского алфа-

вита *m* (читается «эм»). Чтобы иметь возможность сравнивать массы различных тел, надо массу какого-нибудь из них принять за единицу. Выбор единицы массы произволен, однако она должна быть удобной для практического применения. В 1889 г. на международном конгрессе для сравнения масс тел условились использовать эталон килограмма — *щательно изготовленный образец в виде цилиндрической гири* (с диаметром основания и высотой 39 мм) и эталонные весы. Массу этого образца условились считать за 1 кг (килограмм) (от греч. *chilioi* — тысяча и лат. *gramma* — мелкая мера массы). Этalon килограмма отлит из сплава двух металлов: платины (90 %) и иридия (10 %) (рис. 96). В Международной системе единиц (СИ) 1 кг — основная единица массы. Существует международный эталон килограмма, который хранится во Франции в пригороде Парижа — Севре в Международном бюро мер и весов. С международного эталона с большой точностью изготовлены копии для других стран, в том числе и для нашей страны.

В курсе естествознания вы ознакомились с распространенным способом определения массы — *взвешиванием*.

* **Карат, пуд, куль и другие единицы...** Единицу массы устанавливали по природным образцам, чаще всего по массе какого-нибудь семени. Так, например, массу драгоценных камней определяли и до сих пор определяют в *каратах* — это масса семени одного из видов бобов. В южных странах растет дерево каруба из семейства акаций. Семена этой акации созревают в стручке, как фасолины или горошины. Но самое удивительное, что все они одинаковой массы. По-русски — стручок, а по-гречески — каратония. От этого слова и пошло название семян-гирек. Каждое из семян массой ровно в 5 раз меньше одного грамма (1 карат = 0,2 г). Зернышками акации сегодня, разумеется, алмазы уже никто не взвешивает. Для этого пользуются специальными алмазными весами. Они показывают не граммы или миллиграммы, а сразу караты.

Позднее за единицу массы стали принимать массу воды, заключенной в сосуд определенной вместимости. Например, в Древнем Вавилоне за единицу массы принимали *талант* — массу воды, наполняющей такой сосуд, из которого вода равномерно вытекает через отверстие определенного размера в течение одного часа.

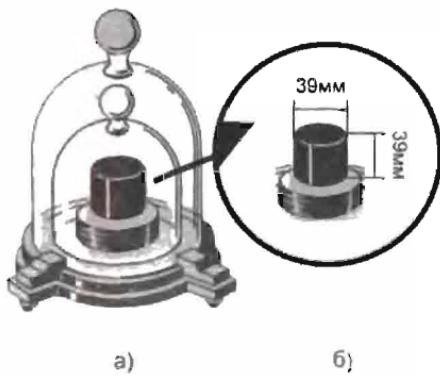


Рис. 96. Эталон килограмма

На Руси древней единицей массы была *гривна* (1 гривна = = 409,5 г). Существует предположение, что эта единица ввезена с Востока. С XVI в. гривна стала денежной единицей, равной 10 к. А единица массы в две гривны получила название *фунта*. Для определения больших масс использовали *пуд* (1 пуд = 16,38 кг), а малых — *золотник* (1 золотник = 4,27 г).

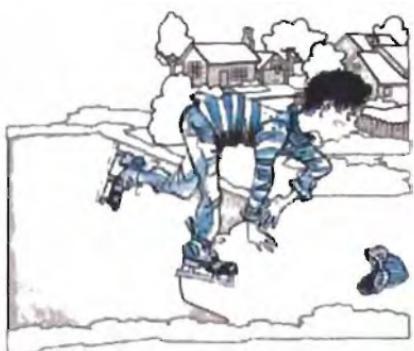


Рис. 97

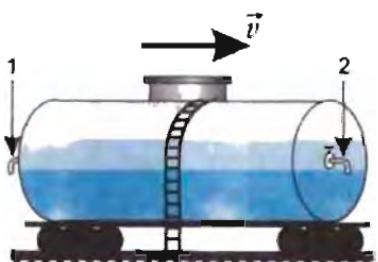


Рис. 98



Рис. 99

Для определения массы сыпучих веществ использовали *куль*. В зависимости от сорта сыпучих веществ мера имела разное числовое значение. Например, для ржи куль был равен 151,3 кг, для овса — 100,3 кг.

В конце XVIII в. при создании метрической системы мер 1 кг определили как массу одного кубического дециметра (1 дм³) дистиллированной воды при температуре 4°C (при ее наибольшей плотности).

? 1. Наверное, вы замечали, что если неожиданно выезжаете с гладкого льда на снег, то падаете вперед (рис. 97). Почему? 2. На рисунке 98 стрелкой показано направление движения цистерны с водой. Когда цистерна тронется с места, из какого крана: 1 или 2 — польется вода? Ответ обоснуйте.

● Используя текст учебников «Естествознание, 5–6» или «Естествознание, 5–7», ответьте на вопросы: 1) Как устроены рычажные весы? 2) Какие гири входят в набор гирь для лабораторных весов? 3) Какие правила необходимо соблюдать при измерении массы тела?

◆* Положите лист бумаги на край стола. На лист бумаги поставьте пластмассовый стакан с водой так, как показано на рисунке 99. Свешивающийся ко-

нец листа возьмите одной рукой, а ребром ладони другой руки резко ударьте по листу. Объясните результаты опыта.

§ 14. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Первый закон Ньютона – закон инерции. Опыты, подобные тем, которые описаны в § 13 (см. рис. 92), проводил Г. Галилей. Анализ результатов опытов позволил Галилею сформулировать закон инерции: если на тело не действуют другие тела, оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения относительно Земли.

Обобщив и уточнив результаты работ Галилея, английский ученый Исаак Ньютон в своем труде «Математические начала натуралистической философии» включил закон инерции в число основных аксиом движения. Закон инерции часто называют первым законом Ньютона.

В первом законе Ньютона утверждается, что: существуют такие системы отсчета, в которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются¹.

Таким образом, в первом законе Ньютона постулируется существование таких систем отсчета, в которых выполняется закон инерции. Эти системы отсчета получили название **инерциальных систем отсчета**. Системы отсчета, в которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются, называются **инерциальными системами отсчета** (ИСО).

Первый закон Ньютона, с одной стороны, содержит определение инерциальных систем отсчета, а с другой стороны – в нем постулируется, что такие системы существуют. Доказать теоретически первый закон (закон инерции) невозможно; его следует рассматривать как результат обобщения экспериментальных фактов. Вместе с тем ни один прямой опыт не может его подтвердить с абсолютной точностью, так как нельзя пренебречь влиянием окружающих тел. В § 13 мы уже обсудили вопрос о том, что, чем меньше воздействие на данное тело со стороны других тел, тем ближе скорость тела к постоянной величине (см. опыт на рис. 92, в). Представьте себе, что если поверхность стекла идеально гладкая и отсутствует атмосфера, то шарик при движении совсем не будет изменять свою скорость. Понятно, что та-

¹Формулировка этого закона, данная самим Ньютоном, отличается от приведенной здесь.



Ньюто́н Исаак (1643—1727) — английский ученый, заложивший основы современного естествознания, создатель классической физики. В нем сочетались мастерство экспериментатора и смелость мысли теоретика. Научные интересы относятся к механике, оптике, астрономии, математике. В 1687 г. издана книга «Математические начала натуральной философии», в которой он обобщил результаты исследований своих предшественников в области механики и свои собственные. В этом труде им были введены основные понятия механики (масса, ускорение, сила, импульс), а также сформулированы законы классической механики (первый, второй, третий, закон всемирного тяготения). Используя закон всемирного тяготения, Ньютон объяснил движение небесных тел (планет и их спутников, комет) и создал теорию тяготения. Он объяснил особенности движения Луны, приливы и отливы, рассмотрел проблему создания искусственного спутника Земли и др. Ньютон разработал метод научного исследования физических явлений — «метод принципов»: на основе опыта формулируются общие закономерности — аксиомы или принципы, и из них выводятся отдельные законы и положения, которые должны быть проверены на опыте.

Ньютон своим законом всемирного тяготения создал астрономию, разложением света — научную оптику... познанием природы сил — научную механику.

Ф. Энгельс

кие условия для движения шарика создать мы не можем (причину рассмотрим в § 23).

Первый закон Ньютона инерциальные системы отсчета ставит в особое положение. Но как установить, что какая-либо система отсчета является инерциальной? Это можно сделать только на основе эксперимента. Проведем мысленный эксперимент. Представим, что мы едем в купе поезда, движущегося равномерно и прямолинейно, где все предметы находятся в покое. Если на поверхность откидного стола положить шарик, то он будет покояться относительно нас, так как притяжение Земли компенсируется влиянием стола. С вагоном поезда можно связать *инерциальную систему отсчета*. Шарик в этой системе находится в покое. Если же поезд будет двигаться равномерно по дуге окружности (его скорость меняет направление), то шарик начнет двигаться по столу, хотя в горизонтальном направлении на него не действует никакое другое тело. Следовательно, в этом случае система отсчета, связанная с вагоном поезда, будет *неинерциальной*.

Является ли система отсчета, связанная с Землей, инерциальной системой отсчета? Это очень важный вопрос, потому что все эксперименты мы проводим на Земле. Вы знаете, что Земля движется вокруг Солнца почти по круговой орбите, а также вращается вокруг своей оси. Строго говоря, система отсчета, связанная

с Землей (рис. 100), не является инерциальной. Однако отличие этой системы от инерциальной будет очень малым, так как за те небольшие интервалы времени, за которые мы проводим эксперименты, дугу орбиты, по которой движется Земля, можно с большой точностью считать отрезком прямой линии. Ускорение же, возникающее из-за вращения Земли, тоже очень мало. Поэтому с точностью, необходимой для проведения наших экспериментов, мы можем считать систему отсчета, связанную с Землей, инерциальной. Этим приближением мы будем пользоваться в дальнейшем, т. е. считать систему отсчета «Земля» инерциальной.

Когда же возникает необходимость, например, определить особенности океанских течений, характер движения воздушных масс в циклонах и антициклонах, рассчитать движение космических аппаратов, то с гораздо большей точностью используется инерциальная система «Солнце». При этом точка отсчета совмещается с центром Солнца, а координатные оси направляются на удаленные звезды (рис. 101).

Принцип равноправности инерциальных систем отсчета. В приведенном выше примере с шариком, находящимся на столе равномерно и прямолинейно движущегося поезда, мы систему отсчета считали инерциальной. Если же мы посмотрим в окно поезда, то увидим, что все предметы, неподвижные относительно Земли (столбы, будки, машины на автостоянке), движутся относительно нас с постоянной скоростью. С другой стороны, для наблюдателя, находящегося на Земле, наш вагон (поезд) и шарик будут двигаться равномерно и прямолинейно. С Землей мы также можем связать систему отсчета, которая будет инерциальной системой отсчета. Для систем отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, состояния покоя и равномерного прямолинейного движения будут эквивалентными.

Мы условились систему отсчета, связанную с Землей, считать инерциальной. Поэтому любая система отсчета, движущаяся от-

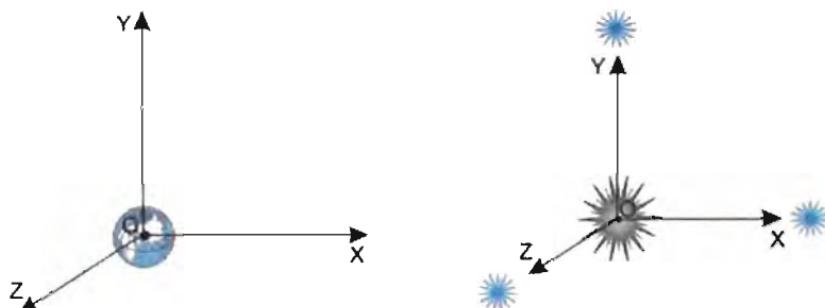


Рис. 100. Инерциальная система «Земля»

Рис. 101. Инерциальная система «Солнце»

носительно Земли равномерно и прямолинейно, также является инерциальной. **Принцип равноправности инерциальных систем отсчета** состоит в следующем: если известна из опыта хотя бы одна инерциальная система отсчета, то инерциальными будут любые другие системы отсчета, движущиеся относительно избранной равномерно и прямолинейно.

✿ **Принцип относительности в механике.** Галилей впервые обратил внимание на то, что равномерное и прямолинейное движение по отношению к Земле не сказывается на протекании механических процессов.

Проведем мысленный эксперимент. Представьте, что вы в комнате играете в мяч, ударяя по нему сверху. Мяч будет двигаться вверх—вниз; траектория — прямая линия. Если же вы находитесь на палубе теплохода, в вагоне поезда или в салоне самолета, движущихся плавно и без толчков (равномерно), то траектория движения мяча также будет прямой линией. Вы можете наблюдать колебания нитяного маятника, изучать колебания стальной линейки, капать из пипетки жидкость и на палубе теплохода, и в вагоне поезда, и в салоне самолета. Результаты будут точно такими же, как и при исследовании этих явлений в комнате.

На основании подобных наблюдений можно сформулировать один из фундаментальных принципов в физике — **принцип относительности: все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета**. Это утверждение известно как **принцип относительности в механике** (или **принцип относительности Галилея**).

1. Используя текст § 14: 1) найдите формулировку закона инерции. Кто первым сформулировал этот закон; 2) найдите формулировку первого закона Ньютона; 3) найдите определение ИСО. Приведите примеры, когда систему отсчета можно считать инерциальной.

2. Обоснуйте справедливость утверждения: «Систему отсчета, связанную с Землей, можно считать инерциальной системой отсчета».

3. Приведите примеры, когда выполняется принцип равноправности инерциальных систем отсчета.

4. Выберите правильный ответ.

Ниже перечислены движения тел относительно Земли. Какую систему отсчета, связанную с одним из этих тел, нельзя считать ИСО? Систему отсчета, связанную с Землей, примите за инерциальную.

А. Девочка бежит с постоянной скоростью.

Б. Автомобиль движется равномерно на горизонтальном участке дороги.

В. Поезд движется равноускоренно.

Г. Хоккейная шайба равномерно скользит по гладкому льду.
Д. Парашютист спускается равномерно и прямолинейно.

§ 15. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. СИЛА. СЛОЖЕНИЕ СИЛ

Движение и взаимодействие. В окружающем нас мире все находится в непрерывном движении и изменении. Но, двигаясь, тела действуют друг на друга, т. е. взаимодействуют. *Влияние тел на движение друг друга называется взаимодействием.*

С взаимодействием тел мы сталкиваемся постоянно. Взаимодействие – сложное, но очень важное понятие. *Взаимодействие, так же как и движение, – неотъемлемое свойство материи.* Чтобы получить первые представления о сущности этого понятия, рассмотрим примеры взаимодействия тел.

Пример 1. На рисунке 102, а изображена тележка с прикрепленной к ней упругой пластиной (например, стальной линейкой). Пластина согнута и связана нитью. Тележка находится в покое в инерциальной системе отсчета XOY , связанной со столом. Будет ли тележка двигаться, если пластина выпрямится? Ответ на вопрос может дать эксперимент. Пережгем нить. Пластина резко выпрямляется, но тележка остается на прежнем месте (тележка не перемещается относительно указателя) (рис. 102, б).

Пример 2. Поставим по другую сторону согнутой пластины еще одну такую же тележку (рис. 103, а). Что произойдет с тележками после пережигания нити? Ответ на вопрос может дать также эксперимент. После пережигания нити обе тележки приходят в движение и разъезжаются в разные стороны (рис. 103, б). Из результатов эксперимента можно сделать вывод: *для изменения скорости тележки понадобилось второе тело – вторая тележка.* В движение пришла и вторая тележка, обе они стали двигаться относительно стола, обе подействовали друг на друга. Значит, *действие одного тела на другое не может быть односторонним.* Обе тележки действуют друг на друга, т. е. *взаимодействуют.*

Пример 3. Представим такую ситуацию: в двух лодках сидят мальчики (рис. 104, а). Один из них толкает лодку своего товарища, но и его лодка приходит в движение. Обе лодки после взаимодействия станут двигаться в противоположные стороны (рис. 104, б).

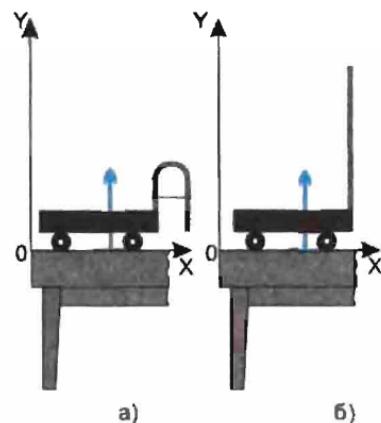


Рис. 102

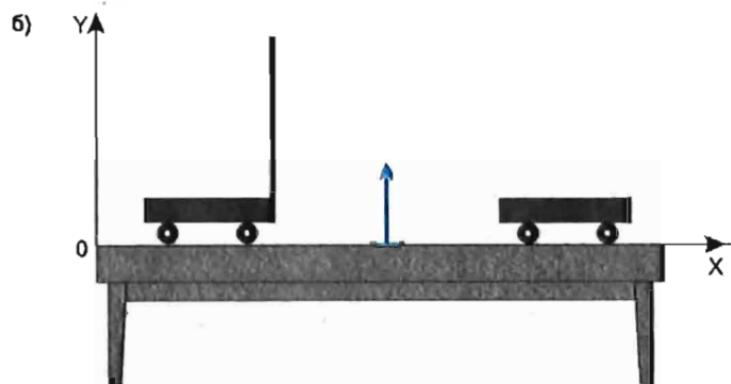
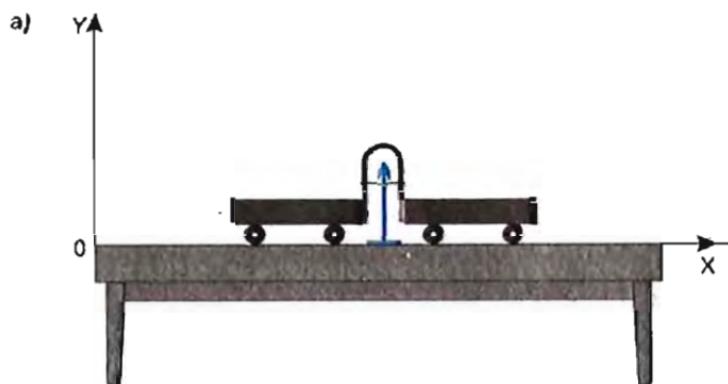


Рис. 103



Рис. 104

Пример 4. Хоккейная шайба, взаимодействуя с бортом площадки, изменяет направление своего движения (рис. 105), а борт приходит в колебательное движение.



Рис. 105

Пример 5. Мальчик на роликовых коньках прислоняется к стене (рис. 106, а). Оттолкнувшись от стены, он приобретает некоторую скорость \vec{v} (рис. 106, б). Что значит «оттолкнувшись»? Мальчик подействовал на стену, толкая ее от себя. Однако стена также подействовала на мальчика, и он приобрел скорость, направленную от стены.

Пример 6. На рисунке 107 приведена стробоскопическая фотография взаимодействия двух шаров. Шар 1, имея скорость \vec{v}_1 , сталкивается с неподвижным шаром 2. После взаимодействия (столкновения) шары начинают двигаться под углом друг к другу, приобретая скорости \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 . Наглядным примером такой ситуации может быть игра в бильярд.

Пример 7. Если вы возьмете теннисный мяч и прижмете его к стене, то при взаимодействии пальца и мяча, стены и мяча он деформируется (рис. 108). При этом заметна деформация пальца, но не заметна деформация стены.

Пример 8. На рисунке 109 приведен кадр из фильма, в котором с помощью скоростной съемки зафиксирован удар теннисной ракетки по мячу. При этом изменение скорости движения мяча и его деформация происходят одновременно.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что в процессе взаимодействия тел происходит изменение скорости их движения (т. е. возникает ускорение) и тела деформируются. В одних случаях заметнее изменение скорости движения тел (примеры 2 – 6), в других заметнее деформация (примеры 7 и 8). *Взаимодействие тел является причиной возникновения у тел ускорений, а ускорение – следствие их взаимодействия.* Таким

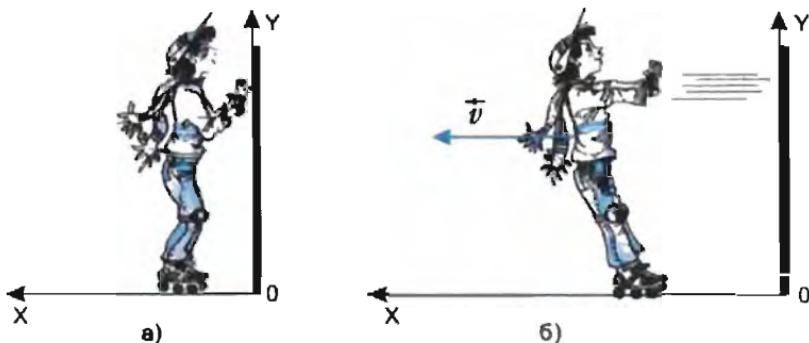


Рис. 106

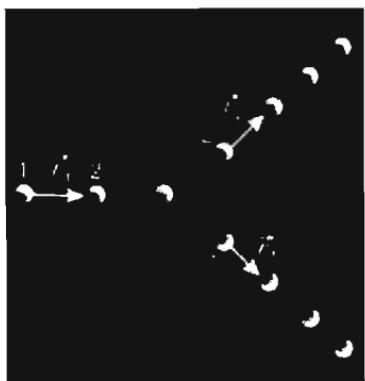


Рис. 107

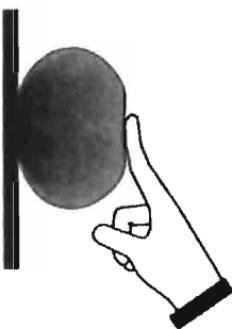


Рис. 108

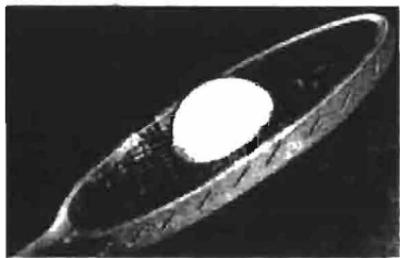


Рис. 109

образом, при взаимодействии ярко проявляется принцип причинности.

Может быть и такая ситуация, когда тело покоятся (пример 7) или движется равномерно и прямолинейно (т. е. $a = 0$), хотя на него действуют другие тела (в примере 7 одновременно

действуют палец и стена). Приведем другой пример. На столе неподвижно лежит учебник (т. е. его ускорение равно нулю). Но на учебник в вертикальном направлении действуют вниз притяжение Земли, вверх стол. В этом случае говорят, что *действия тел компенсируются*. Учебник сам по себе не придет в движение. Но если на него подействовать рукой (толкнуть), то учебник начнет перемещаться по поверхности стола.

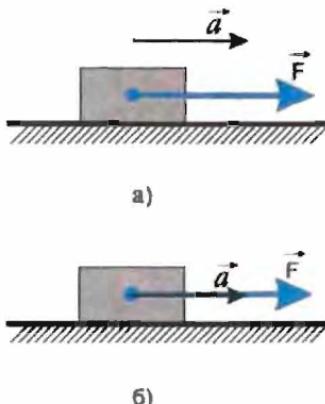
Для характеристики взаимодействия тел в физике введена особая величина — *сила*. Количество меру действия тел друг на друга, в результате которого тела получают ускорение, называют в механике силой. Это не строгое определение силы, но оно помогает понять, что: 1) ускорения тел вызываются силами; 2) силы возникают тогда, когда на данное тело подействовало какое-либо другое тело.

Как было ранее сказано, при взаимодействии тел может изменяться скорость движения, т. е. возникать ускорение. Вы знаете, что ускорение — векторная величина, вызывается оно силой, приложенной к телу. Силе приписывают направление, совпадающее с направлением ускорения, которое возникает в результате взаимодействия тел. Сила — векторная величина. Прямая, вдоль которой действует сила, называется линией действия силы.

Как вы знаете из курса естествознания, сила обозначается буквой латинского алфавита F и читается «эф». Поскольку сила — векторная величина, то в дальнейшем будем ее обозначать так: \vec{F} . Сила характеризуется точкой приложения, направлением и числовым значением. Модуль силы будем обозначать либо $|F|$, либо F . Единицу силы в Международной системе единиц (СИ) — ньютон (Н) — называли в честь английского ученого И. Ньютона.

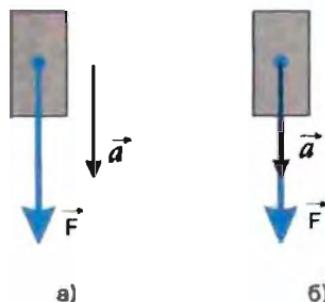
На рисунках 110, 111 показаны направления действия силы и ускорения, с которым движется тело. На рисунках *a*, *b* указаны возможные варианты изображения силы и ускорения.

Измерение сил. В курсе естествознания вы ознакомились с тем, что для измерения силы используется динамометр (силомер). Устройство этого прибора основано на свойстве тел удлиняться, изгибаться или сжиматься при упругой деформации. В за-



б)

Рис. 110



а)

б)

Рис. 111

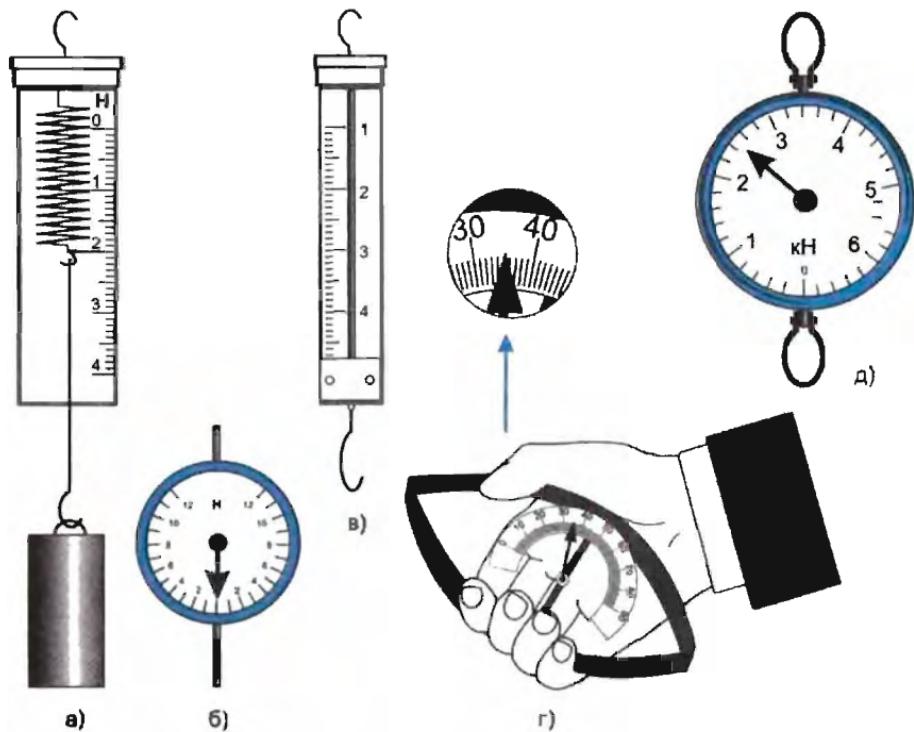


Рис. 112. Внешний вид динамометров: а) лабораторный; б) демонстрационный (с круглым циферблатом); в) бытовые пружинные весы; г) силомер; д) динамометр, предназначенный для измерения больших сил

вистимости от назначения внешний вид динамометров может быть разнообразным (рис. 112).

Сложение сил, направленных по одной прямой. В большинстве случаев на тело действует не одна сила, а сразу несколько сил. Так, на цилиндр, подвешенный к лабораторному динамометру (рис. 112, а), действуют две силы: сила тяжести \vec{F} со стороны Земли и сила упругости $\vec{F}_{упр}$, возникающая в деформированной пружине и действующая на тело (рис. 113).

Если на тело действует несколько сил, то их можно заменить одной силой, равнозначной по своему действию этим силам. Силу, которая производит на тело такое же действие, как несколько одновременно действующих сил, называют равнодействующей силой.

Рис. 113. Силы, действующие на цилиндр

Нахождение равнодействующей нескольких сил называют сложением этих сил. Слагаемые силы называют составляющими силами.

Пример 1. К лабораторному динамометру подвесим груз массой 102 г (на каждый из грузов из набора гирь прикрепим пластилины массой 2 г). При этом на груз действует сила тяжести, равная 1 Н (рис. 114, а). Если подвесим к динамометру три одинаковых груза, то пружина еще больше растянется (деформируется) и указатель динамометра покажет значение силы тяжести, равное 3 Н (рис. 114, б). Когда подвесим к динамометру четыре одинаковых груза, то указатель динамометра покажет значение силы тяжести, равное 4 Н (рис. 114, в). Снимем грузы и заменим одним грузом (цилиндром), который растянет пружину динамометра на такую же длину. Указатель же динамометра покажет значение силы тяжести, действующей на цилиндр, равное 4 Н (рис. 114, г).

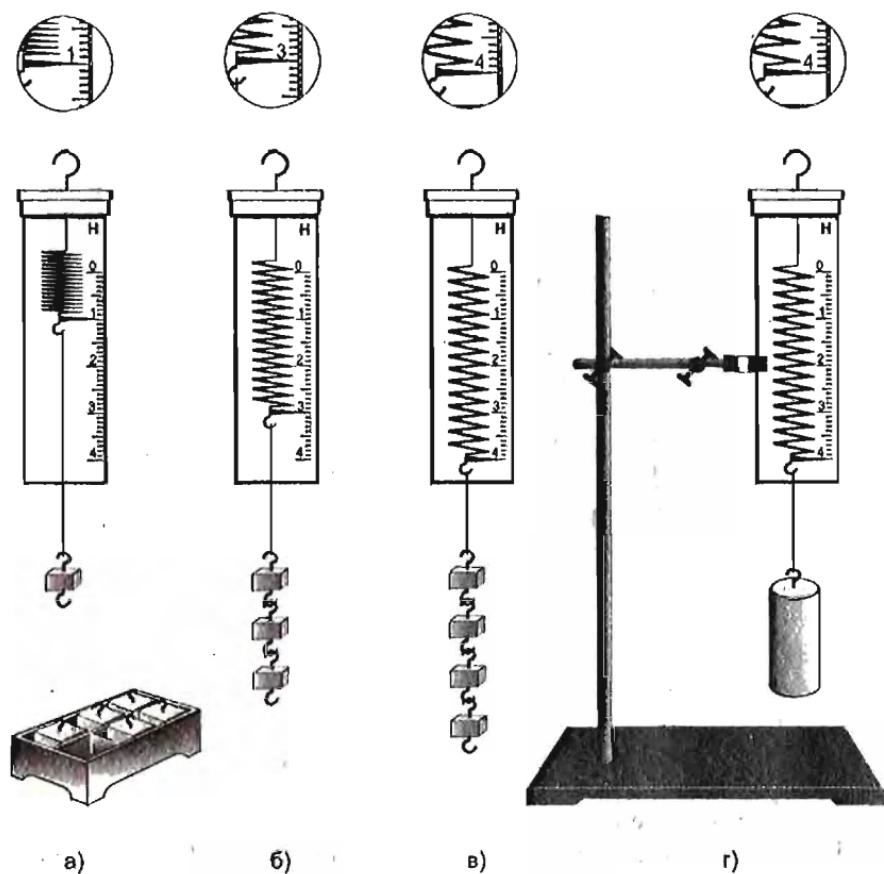
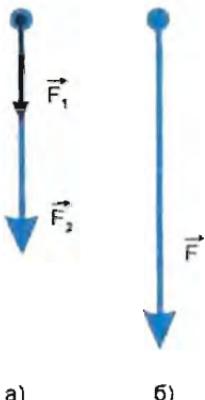


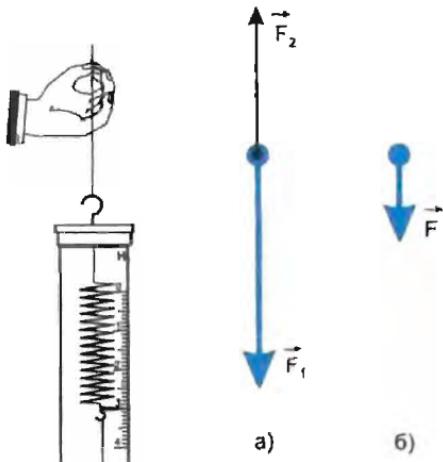
Рис. 114



а)

б)

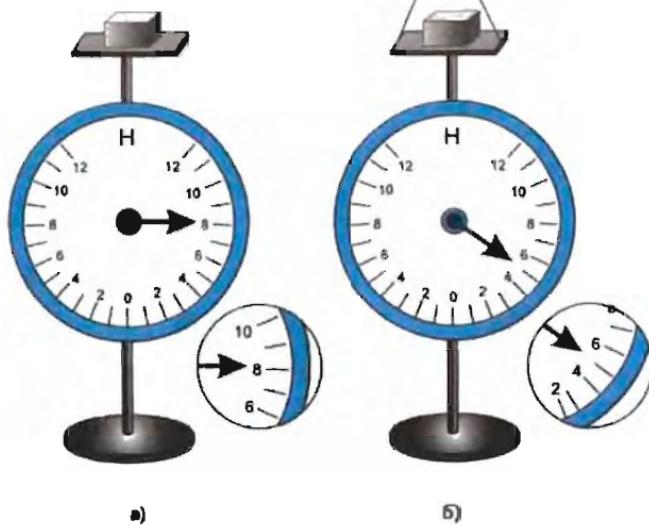
Рис. 115



а)

б)

Рис. 117



а)

б)

Рис. 116

На основании эксперимента можем сделать вывод: **равнодействующая всех сил, направленных вдоль одной прямой в одну сторону, направлена в ту же сторону, а ее модуль равен сумме модулей составляющих сил.**

На рисунке 115, а показано направление составляющих сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , на рисунке 115, б – направление равнодействующей силы \vec{F} . В этом случае $|\vec{F}| = |\vec{F}_1| + |\vec{F}_2|$.

Пример 2. На столик демонстрационного динамометра поместим груз. Динамометр покажет значение силы, действующей на тело. Оно равно 8 Н (рис. 116, а). К столику прикрепим нить и, зацепив за нить лабораторным динамометром, потянем вверх силой 3 Н. Демонстрационный динамометр в этом случае покажет значение 5 Н (рис. 116, б). Эта сила — равнодействующая двух сил: 8 Н и 3 Н. Модуль равнодействующей силы равен разности модулей ее составляющих: $5 \text{ Н} = 8 \text{ Н} - 3 \text{ Н}$. Равнодействующая сила направлена в сторону действия большей силы (рис. 117, б): $|\vec{F}| = |\vec{F}_1| - |\vec{F}_2|$.

На основании эксперимента можем сделать вывод: равнодействующая двух сил, направленных вдоль одной прямой в противоположные стороны, направлена в сторону действия большей силы, а ее модуль равен разности модулей составляющих сил.

Если заменить лабораторный динамометр на демонстрационный и потянуть вверх силой 8 Н, то стрелка нижнего динамометра установится на нулевом делении. Это будет означать, что равнодействующая сила равна нулю. Тело под действием двух равных и противоположно направленных сил будет находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно.

Проекции вектора силы на координатные оси. Проекциями вектора \vec{F} на координатные оси OX и OY называют длины отрезков F_x и F_y (рис. 118), ограниченные проекциями начала и конца вектора на соответствующую координатную ось, взятые со знаком «плюс» или «минус». Проекции вектора — величины скалярные.

Проекция вектора на выбранную координатную ось считается положительной (рис. 118, а, в, г), если от проекции начала вектора к проекции его конца надо «идти» по направлению, совпадающему с выбранным нами положительным направлением координатной оси.

Проекция вектора на выбранную координатную ось считается отрицательной (рис. 118, б, д), если от проекции начала вектора к проекции его конца надо «идти» по направлению, противоположному выбранному нами положительному направлению координатной оси.

Если вектор перпендикулярен координатной оси, то при любом направлении вектора его проекция на координатную ось равна нулю (см. рис. 118, а, б).

? 1. Что такое взаимодействие? 2. «При взаимодействии тел проявляется приводящие причины». Как вы понимаете это утверждение? 3. Какая величина в механике служит количественной мерой действия тел друг на друга? 4. Как обозначается сила и какова ее единица? 5. С помощью какого прибора можно измерить силу?

● 1. Запишите соотношения между единицами силы:

$$1 \text{ кН} = ? \text{ Н}; 1 \text{ мН} = ? \text{ Н}; 1 \text{ Н} = ? \text{ кН};$$

$$1 \text{ Н} = ? \text{ мН}; 2 \text{ кН} = ? \text{ Н}; 15 \text{ мН} = ? \text{ Н}; 0,35 \text{ кН} = ? \text{ Н}.$$

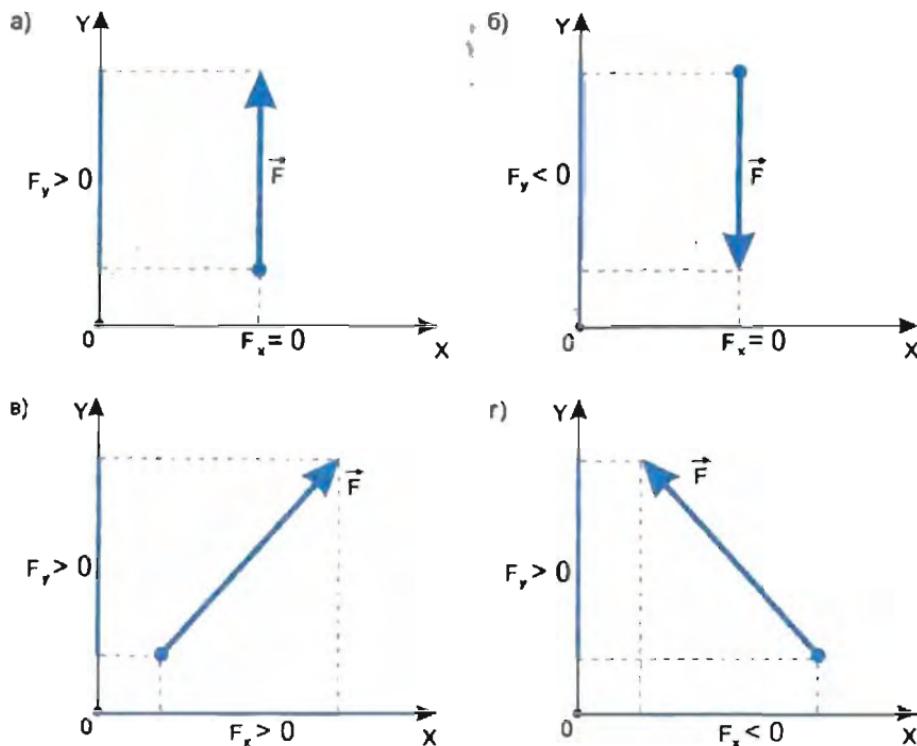


Рис. 118. Проекции вектора силы на координатные оси

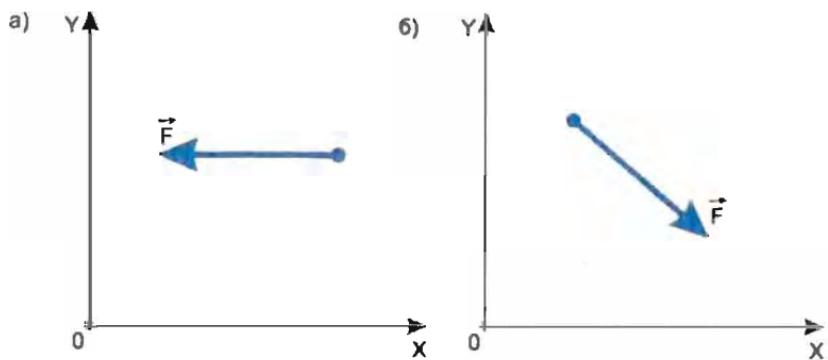


Рис. 119

2. Используя рисунок 112, а, б, г, д, определите: 1) нижний и верхний пределы измерения прибора; 2) цену деления и инструментальную погрешность прибора. 3) Запишите показание прибора с учетом его инструментальной погрешности.

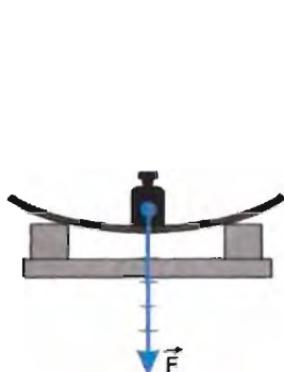


Рис. 120



Рис. 121

* 3. Возьмите у учителя демонстрационный динамометр и изучите его шкалу. Выясните, почему у демонстрационного динамометра двойная шкала?

4. Используя рисунок 119, а, б, определите проекции вектора силы на координатные оси OX и OY . Ответ обоснуйте.

5. Используя рисунок 120, определите силу тяжести, действующую на гирю. Масштаб: 1 деление = 2 Н.

6. Используя рисунок 121, определите силу тяги, действующую на лодку. Масштаб: 1 деление = 7,5 Н.

§ 16. ВТОРОЙ И ТРЕТИЙ ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Второй закон Ньютона – основной закон динамики. Он устанавливает взаимосвязь ускорения, силы и массы: ускорение, приобретаемое телом в результате взаимодействия с другим телом, прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально его массе ($\vec{a} = \vec{F}/m$).

Если на тело одновременно действует несколько сил, то модуль ускорения, приобретаемого телом, будет пропорционален модулю геометрической суммы всех сил, действующих на тело (равнодействующей силе):

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i,$$

где Σ – знак суммы, буква греческого алфавита, читается «сигма»; n – положительное число ($n = 2, 3, 4, \dots$).

Для тела известной массы достаточно измерить ускорение, чтобы определить равнодействующую силу, действующую на тело. Часто именно для силы формулируется второй закон Ньютона:

на: равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на сообщаемое ему ускорение¹.

Математически второй закон Ньютона записывается в виде

••

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a},$$

где $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ — равнодействующая сила; m — масса тела; \vec{a} — ускорение, приобретаемое телом. С целью упрощения записи равнодействующую силу будем обозначать так: $\sum \vec{F}$.

Направление вектора ускорения совпадает с направлением равнодействующей силы.

Математическое выражение второго закона Ньютона называют *уравнением движения тела*.

Из второго закона Ньютона устанавливается единица силы в Международной системе единиц (СИ) — ньютон (Н). За единицу силы принимается сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с²:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

Второй закон Ньютона — один из самых фундаментальных законов природы. Его называют основным законом динамики, так как он позволяет найти положение тела (материальной точки) в любой момент времени — решить основную задачу механики. С этой целью выясняется, какие из окружающих тел оказывают на исследуемое тело существенное действие, затем составляется уравнение движения тела. Из уравнения движения тела определяется ускорение исследуемого тела. Зная ускорение тела и его начальное состояние (x_0 и v_0), можно рассчитать скорость и положение данного тела в любой момент времени. С помощью второго закона Ньютона можно рассчитать движение не только бруска или автомобиля, но и небесного тела, автоматической межпланетной станции.

Во втором законе Ньютона находит наиболее полное математическое выражение *принцип причинности: сила — причина ускорения данного тела*.

Третий закон Ньютона — закон взаимодействия. В § 15 мы обсуждали вопрос о том, что любое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия. Рассмотрим наши представления о сущности этого понятия. С этой целью проведем несколько экспериментов.

¹ Формулировка этого закона, данная самим Ньютоном, отличается от приведенной здесь.

Эксперимент 1. Подвесим две одинаковые гильзы, изготовленные из алюминиевой фольги, на изолирующих нитях (например, на шелковых) (рис. 122, а). Прикоснемся к гильзам (например, стеклянной палочкой, потертой о шелк). Мы заметим, что обе гильзы отклонятся от прежнего положения на одинаковый угол (рис. 122, б). Следовательно, они взаимодействуют с равными по модулю, но противоположно направленными силами (рис. 122, в): $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

Эксперимент 2. Возьмем два лабораторных динамометра. Запечим их друг за друга и разведем в стороны (рис. 123). Изменим силу взаимодействия и убедимся в том, что во всех случаях показания обоих динамометров одинаковые: $F_1 = -F_2$.

Эксперимент 3. Возьмем два одинаковых демонстрационных динамометра и поставим их друг на друга (рис. 124, а). Верхний динамометр давит на нижний силой F_1 , направленной вниз, нижний динамометр фиксирует эту силу. Но одновременно и верхний динамометр показывает равную по модулю силу F_2 , но направленную в противоположную сторону (рис. 124, в). Эксперимент свидетельствует о том, что тела (динамометры) взаимо-

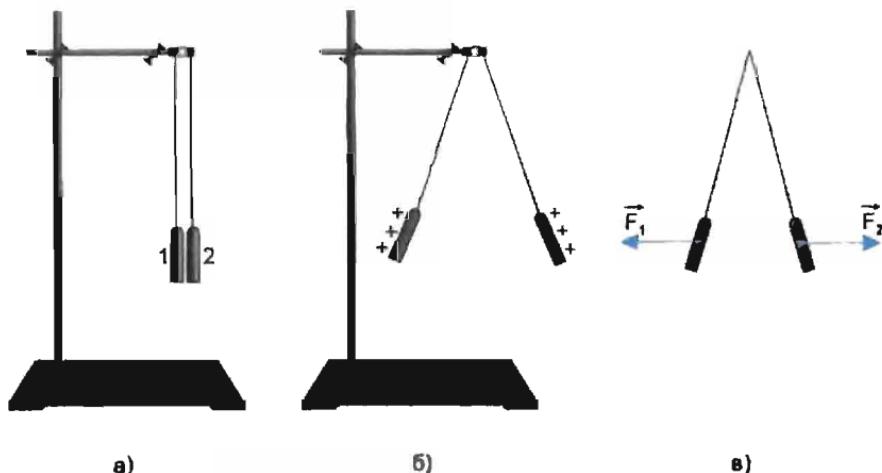


Рис. 122. Взаимодействие заряженных тел

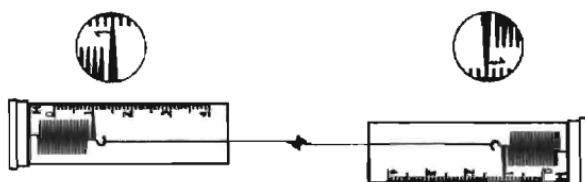


Рис. 123. Взаимодействие лабораторных динамометров

действуют с равными по модулю, но противоположно направленными силами: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

Эксперимент 4. В сосуд, заполненный водой, опустим две дощечки, каждая из которых соединяется со стенкой сосуда динамометром. Установим на одной дощечке сильный магнит 1, а на другой железный бруск 2 (рис. 125). Магнит и железо притягиваются друг к другу, в результате чего дощечки сближаются. Показания динамометров убеждают нас в том, что сила \vec{F}_1 , с которой магнит действует на железный бруск, и сила \vec{F}_2 , с которой железный бруск действует на магнит, равны по модулю и противоположны по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

Из анализа проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что при взаимодействии любых тел возникают силы одновременно, парами. Невозможно реализовать такой случай, чтобы какое-то тело действовало бы на другое тело, не испытывая при этом ответного действия. При этом силы, с которыми действуют тела друг на друга, всегда равны по модулю и противоположны по направлению.

В своем труде «Математические начала натуральной философии», вышедшем в 1687 г., И. Ньюton так сформулировал свой третий закон: *действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.*

Далее Ньютон дает такие разъяснения: «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 лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и, обратно (если можно так выразиться), она с равным усилием оттягивается к камню, ибо натянутый канат своей упругостью производит одинаковое усилие на лошадь в сторону камня и на камень в сторону лошади, и насколько этот канат препятствует

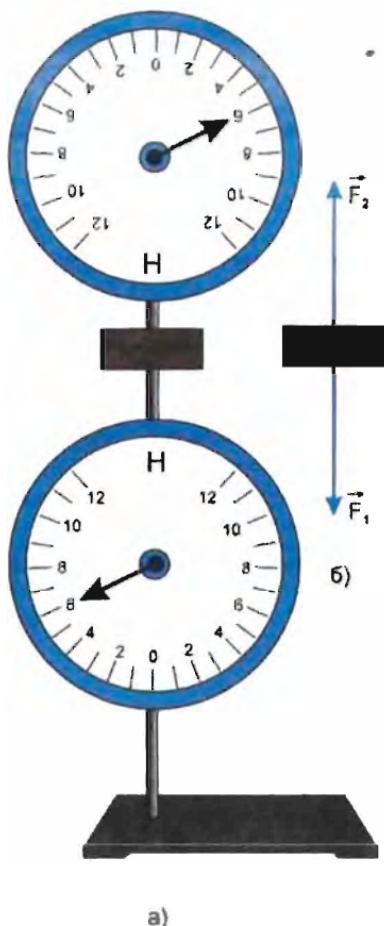


Рис. 124

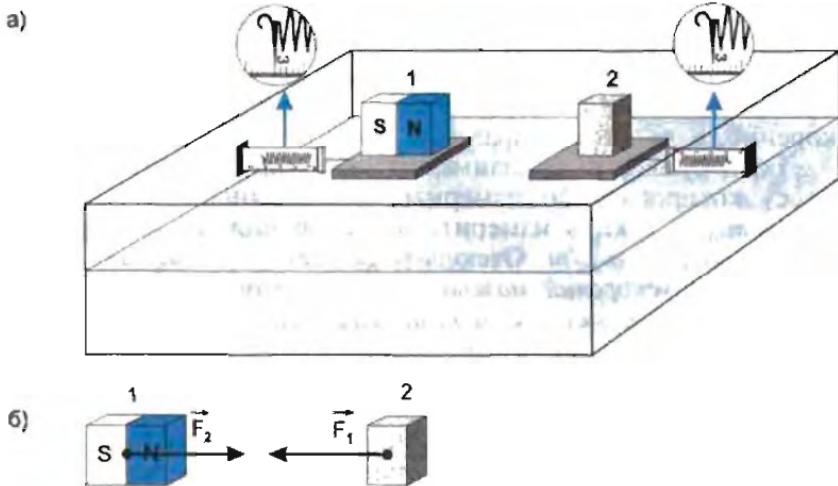


Рис. 125. Взаимодействие магнита и железного бруска

движению лошади вперед, настолько же он побуждает движение камня...»

В формулировке третьего закона, данного Ньютона, использованы термины «действие» и «противодействие». Ньютон под этими терминами понимал силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга. Поэтому в дальнейшем мы будем пользоваться следующей формулировкой третьего закона Ньютона: **силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга, направлены по одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению.**

Математически третий закон Ньютона записывается так:

••

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Важно помнить, что:

1. Силы, возникающие при взаимодействии тел, приложены к разным телам, и поэтому они не могут уравновешивать друг друга. Уравновешиваться могут только силы, приложенные к одному и тому же телу.

2. Силы, с которыми тела действуют друг на друга, одной природы.

Метод измерения массы. Если взаимодействуют два тела массами m_1 и m_2 , то согласно третьему закону Ньютона силы их взаимодействия по модулю равны $|F_1| = |F_2|$. Но по второму закону Ньютона $F_1 = m_1 a_1$ и $F_2 = m_2 a_2$. Значит, $m_1 a_1 = m_2 a_2$, или

$$a_1/a_2 = m_2/m_1 = \text{const}.$$

т.е. отношение абсолютных значений ускорений двух взаимодействующих друг с другом тел определяется их массами и не зависит от условия и способа взаимодействий, от характера действующих между ними сил. Более массивное тело получает небольшое ускорение, а легкое — гораздо большее.

Если привести во взаимодействие (например, толкнуть) тело, массу которого надо измерить, с эталонным телом, имеющим массу $m_{\text{эт}} = 1$ кг, и измерить их ускорения, то получим соотношение $a/a_{\text{эт}} = m_{\text{эт}}/m$. Отсюда масса тела $m = a_{\text{эт}}/a \cdot 1$ кг, т.е. по отношению ускорений можно судить о том, во сколько раз измеряемая масса больше или меньше эталонной. Этот метод используется в том случае, когда нельзя применить известный способ определения массы — взвешивание.

Границы применимости механики Ньютона. Три закона Ньютона, лежащие в основе классической механики, или механики Ньютона, появились как результат обобщения многочисленных наблюдений, опытов и теоретических исследований итальянского ученого Г. Галилея, голландского ученого Х. Гюйгенса и др.

Согласно современным представлениям в первом и втором законах под телом следует понимать *материальную точку*, а под движением — движение относительно *инерциальной системы отсчета*.

Законы Ньютона явились обобщением опытов, которые проводились с макроскопическими телами, обладающими скоростями, намного меньшими скорости света в вакууме: $v \ll c$ (c — скорость света в вакууме; $c = 300\,000$ км/с = $3 \cdot 10^8$ м/с). В процессе развития физики, изучая движение микроскопических объектов — электронов, ионов, атомов, элементарных частиц — при скоростях, сравнимых со скоростью света, обнаружили, что в этом случае законы Ньютона не выполняются. Теорией, описывающей не только медленные, но и быстрые движения частиц, является специальная теория относительности (СТО), основы которой разработаны А. Эйнштейном в 1905 г. С этой теорией вы ознакомитесь в старших классах.

-
- ?
1. Как формулируется второй закон Ньютона? 2. Какова математическая запись второго закона Ньютона? Поясните величины, входящие в это уравнение.
 3. Каковы условия применимости второго закона Ньютона?
 4. Как формулируется третий закон Ньютона? 5. Какова математическая запись третьего закона Ньютона? 6. Каковы условия применимости третьего закона Ньютона?
-

- 1. Выберите правильный ответ.

На рисунке 126, а стрелками показаны направления векторов скорости \vec{v} и ускорения \vec{a} мяча. Какое направление — A , B , V или G — имеет вектор равнодействующей всех сил, приложенных к данному телу (рис. 126, б)?

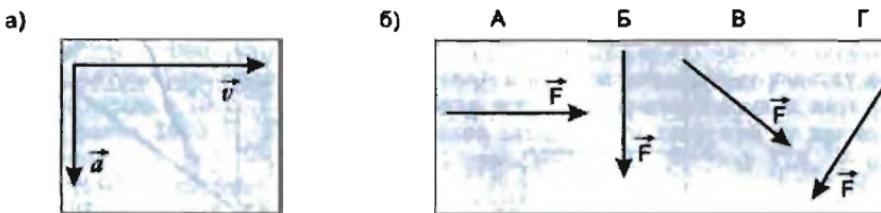


Рис. 126

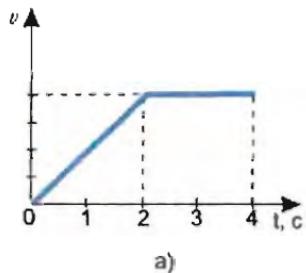
2. Выберите правильный ответ.

Равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю. Движется это тело или находится в состоянии покоя?

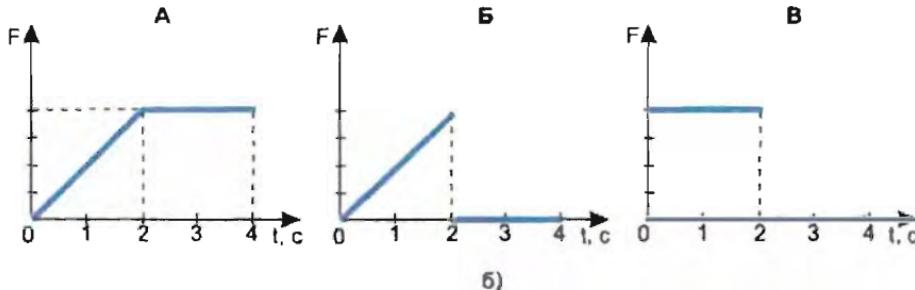
- A. Тело движется равномерно и прямолинейно.
- B. Тело движется равномерно по окружности в горизонтальной плоскости.
- C. Тело находится в состоянии покоя.
- D. Тело движется равноускоренно.

3. Выберите правильный ответ.

На рисунке 127, а изображен график зависимости скорости от времени $v = v(t)$. Какой из приведенных ниже графиков — А, Б или В (рис. 127, б) — выражает зависимость модуля равнодействующей силы от времени $F = F(t)$? Ответ обоснуйте.



а)



б)

Рис. 127

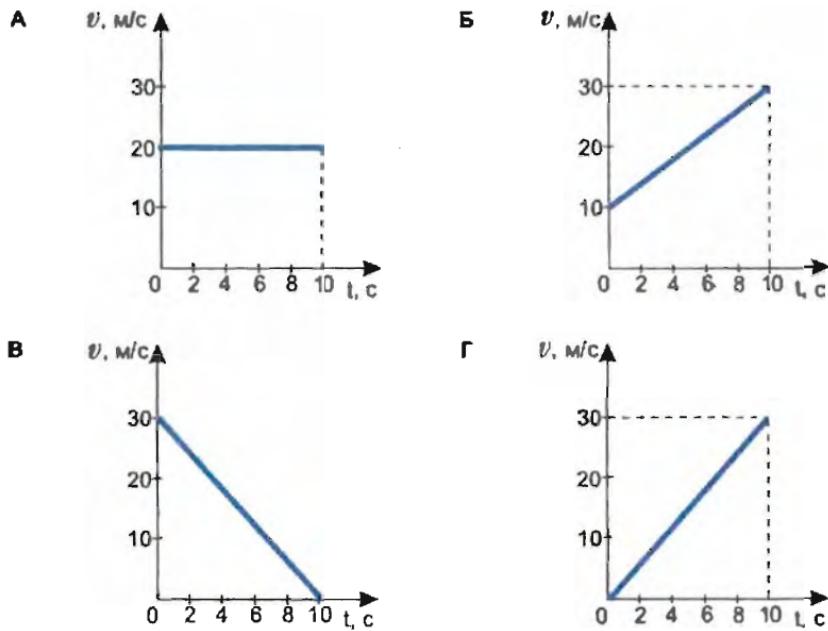


Рис. 128

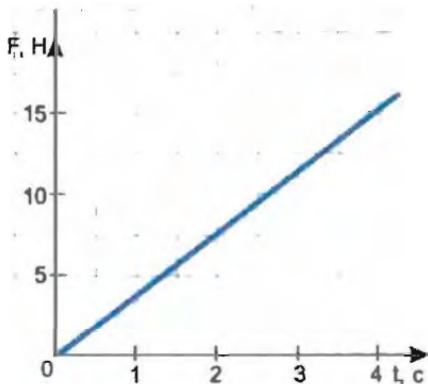


Рис. 129

4. Выберите правильный ответ.

Два мальчика взялись за руки. Первый мальчик толкает второго с силой 105 Н. С какой силой толкает второй мальчик первого?

- A. 0.** **Б. 50 Н.** **В. 105 Н.** **Г. 210 Н.**

■ 1. Сила тяги ракетного двигателя первой отечественной экспериментальной ракеты на жидком топливе равнялась 640 Н. Стартовая масса ра-

кеты была равна 29,5 кг. Какое ускорение приобретала ракета во время старта?

2. Автомобиль массой 1000 кг движется по горизонтальному участку дороги в течение 10 с. Равнодействующая всех сил, приложенных к автомобилю, равна 2000 Н. Какой из графиков зависимости скорости от времени движения $v = v(t)$ — А, Б, В или Г, приведенных на рисунке 128, — соответствует движению автомобиля?

3. Тело массой 5 кг начинает движение из состояния покоя под действием постоянной по направлению силы. На рисунке 129 изображен график изменения значения силы с течением времени. Чему равна скорость тела в конце четвертой секунды?

§ 17. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Могучие силы
Сокнуло в миры,
И чудной, прекрасной
Повеяло жизнью.

А. Кольцов

Фундаментальные взаимодействия. Несмотря на разнообразие воздействий тел друг на друга, в природе, по современным данным, имеется лишь четыре вида фундаментальных взаимодействий: гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное. Эти взаимодействия проявляются в безграничных просторах Вселенной, на нашей Земле, в любом куске вещества, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и при взаимных превращениях элементарных частиц. Каждый вид взаимодействия имеет свой закон убывания с расстоянием, радиус действия и круг процессов, где их проявление наиболее существенно.

Гравитационное взаимодействие (от лат. *gravitas* — тяжесть, тяготение) — универсальное взаимодействие между любыми видами материи. Оно имеет бесконечный радиус действия. Гравитационное взаимодействие существенно для всех тел Вселенной. На малых расстояниях оно проявляется слабо, и эффекты гравитационного взаимодействия в процессах превращения элементарных частиц обычно не учитываются.

Слабое взаимодействие обладает настолько малым радиусом действия, что он до сих пор не измерен. На расстоянии $\approx 2 \cdot 10^{-18}$ см им можно пренебречь. Однако, несмотря на малую величину и короткодействующий характер, слабое взаимодействие играет важную роль в природе. Благодаря слабому взаимодействию возможен процесс превращения элементарных частиц. Эти вопросы мы рассмотрим в старших классах.

Электромагнитное взаимодействие может приводить как к притяжению, так и к отталкиванию. Это отражает существование двух разноименных зарядов — положительного и отрицательного. Электромагнитное взаимодействие между положительно

заряженными ядрами атомов и отрицательно заряженными электронами обеспечивает само существование атомов. В курсе 7 класса мы рассматривали взаимодействие атомов в молекуле (см. § 8). Силы взаимодействия между атомами в молекуле — силы электромагнитного взаимодействия. К электромагнитным взаимодействиям относится большинство сил, наблюдаемых в макроскопических явлениях: силы упругости, трения, поверхностного натяжения жидкостей и др. Свойства различных агрегатных состояний вещества также определяются электромагнитным взаимодействием. Как и гравитационное взаимодействие, электромагнитное взаимодействие медленно убывает с расстоянием и имеет бесконечный радиус действия.

Сильное взаимодействие является короткодействующим: его радиус действия примерно равен 10^{-13} см, т. е. оно проявляется в атомном ядре. Вопросы проявления сильного взаимодействия будем обсуждать в старших классах.

Гравитационное поле. В современной физике считается, что взаимодействие между телами осуществляется посредством создаваемой этими телами особого вида материи — гравитационного поля. Одно из тел непосредственно не действует на другое, оно создает гравитационное поле, которое и воздействует на другое тело. Никакой наглядной картины поля дать невозможно.

Гравитационное поле существует вокруг любого тела, обладающего массой: карандаша, камня, человека, планеты, Солнца, звезд, звездных систем — галактик. При этом тело, создающее поле, действует на другое тело так, что у него появляется ускорение, всегда направленное к источнику поля. Появление ускорения означает, что между телами возникает притяжение. Гравитационное поле усиливается с увеличением массы тела и ослабляется с увеличением расстояния. Гравитационными полями элементарных частиц пренебрегают, так как их массы малы.

Как вы знаете, масса Солнца примерно равна $2 \cdot 10^{30}$ кг, что составляет 99,87% от общей массы Солнечной системы. Поэтому гравитационное поле Солнца « управляет » движением почти всех остальных тел системы: планет, комет, астероидов, метеоритов, метеорных тел. На рисунке 130 приведено строение Солнечной системы. Все планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Орбиты планет по форме близки к круговым, а плоскости орбит — к основной плоскости Солнечной системы.

Спутники планет обращаются вокруг своих планет, гравитационное поле которых из-за их близости оказывается сильнее солнечного. На фотографиях изображены планета Юпитер и ее четыре ближних спутника: Ио, Европа, Ганимед и Калисто (рис. 131), планета Уран и ее ближние спутники (рис. 132). На рисунке 133 изображен внешний вид планеты Сатурн, где хорошо видно кольцо Сатурна. Оно (рис. 134) состоит из огромного числа отдельных «спутников» Сатурна — частиц из обычного водяного льда самых разных размеров: от мелких пылинок до

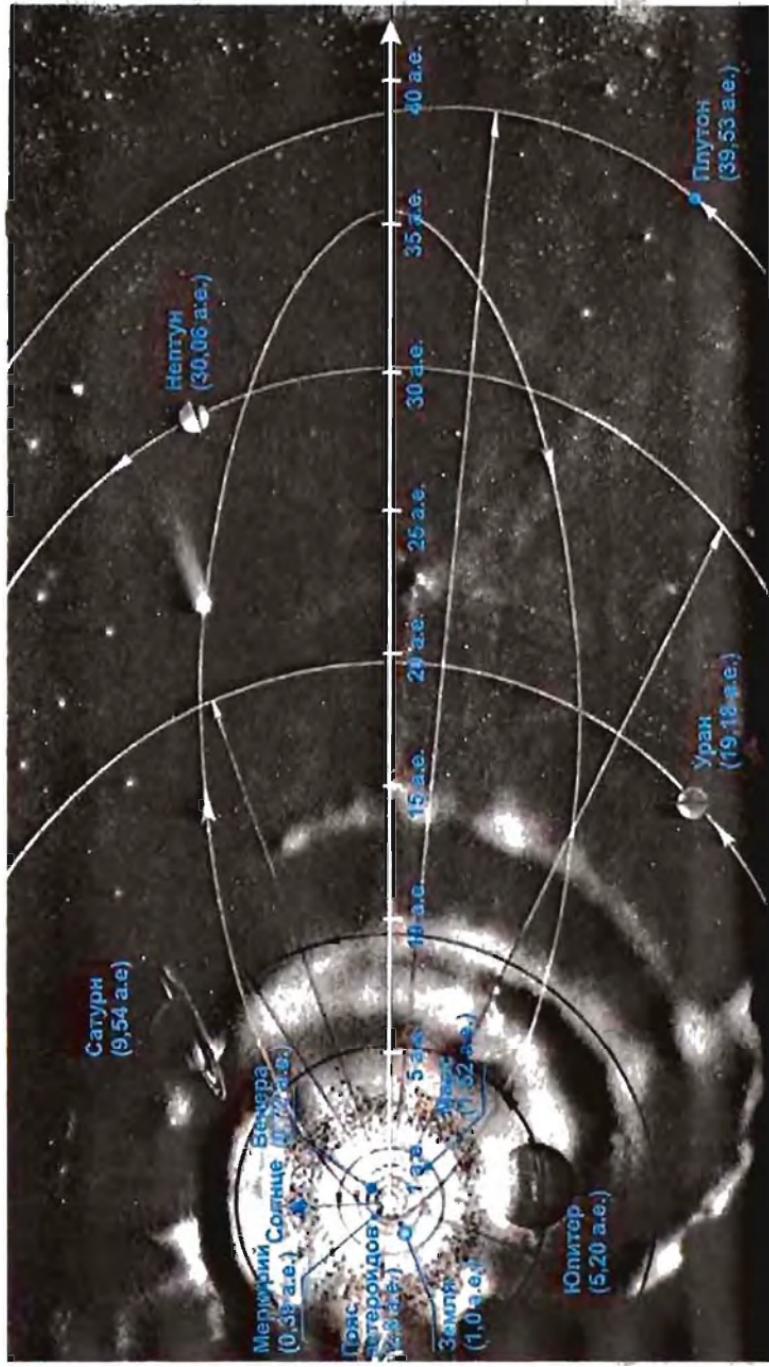


Рис. 130. План Солнечной системы.
Указаны средние расстояния планет от Солнца в астрономических единицах (а. е.)

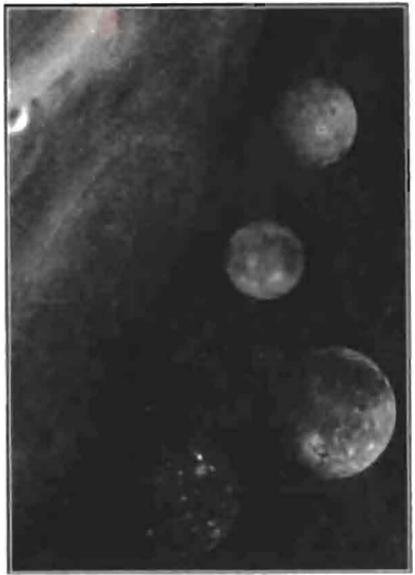


Рис. 131. Планета Юпитер и ее четыре спутника (монтаж, сравнительные размеры не соблюдены)

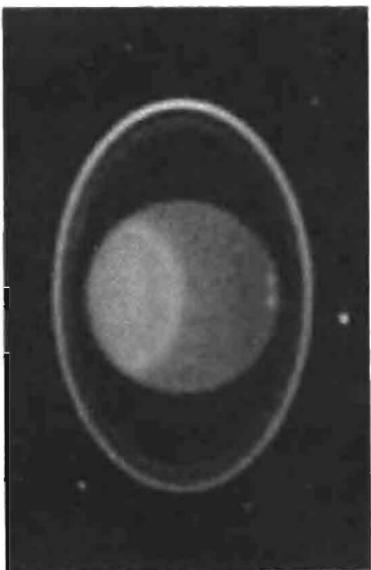


Рис. 132. Планета Уран и ее спутники

глыб с поперечником 10–15 м. Эти тела обращаются в гравитационном поле Сатурна со скоростью около 10 км/с. Из-за влияния гравитационных полей многочисленных спутников планеты (к 1995 г. было известно 22 спутника) кольца Сатурна изгибаются волнами высотой в несколько сот метров.

На рисунке 135 приведена фотография шарового скопления. Гравитационное поле «сплотило» в этом скоплении сотни тысяч звезд. Американский физик-теоретик Ричард Фейнман писал, что «нужно быть лишенным воображения, чтобы не видеть здесь работы тяготения».

Гравитационное поле соединяет воедино горные породы, собирает воды планеты, образуя моря и океаны, удерживает у поверхности Земли ее атмосферу. Не будь гравитационного поля (гравитационного взаимодействия), Земля и другие тела Солнечной системы — от небольшого астероида до гигантского Юпитера — изменили бы свое движение и «понеслись» бы в разные стороны Вселенной. Распались бы галактики, скопления, т.е. разрушилась бы Вселенная.

Особенность гравитационного поля — его всепроникающая способность, оно проникает сквозь любые материалы. От гравитационного поля нельзя защищаться. Если между двумя телами поместить в виде экрана еще одно тело, то притяжение между двумя первыми телами нисколько не ослабляется. Для обнаружения гравитационного экранирования проводились специальные эксперименты, которые дали отрицательный результат.

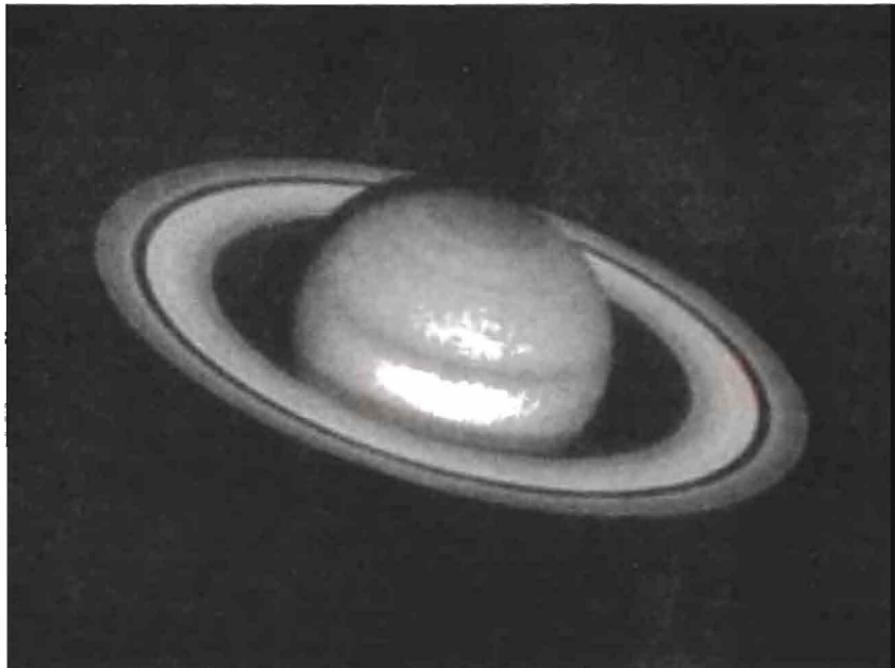


Рис. 133. Планета Сатурн

Закон всемирного тяготения. Первые высказывания о тяготении как о всеобщем свойстве тел относятся к Античности. В XVI — XVII вв. в Европе возродилась попытка доказательства существования взаимного тяготения тел. Немецкий астроном *И. Кеплер* считал, что «тяжесть есть взаимное стремление всех тел». И. Ньютон был первым, кто сначала догадался, а потом и строго доказал, что причиной падения камня (или яблока, согласно распространенному преданию) на землю, движения Луны вокруг Земли, планет вокруг Солнца является сила тяготения, действующая между телами Вселенной. Окончательно закон всемирного тяготения был сформулирован Ньютона в 1687 г. в его труде «Математические начала натуральной философии». Закон всемирного тяготения гласит: две любые материальные частицы массами m_1 и m_2

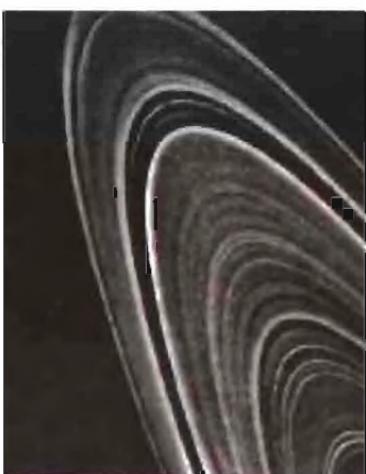


Рис. 134



Рис. 135. Яркое шаровое скопление в созвездии Тукана

притягиваются по направлению друг к другу с силой F , прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния R между ними¹.

Под материальными частицами здесь понимаются любые тела при условии, что их линейные размеры много меньше расстояния между ними.

Математически закон всемирного тяготения записывается так:

••

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где F — сила всемирного тяготения; m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел; R — расстояние между центрами взаимодействующих тел; G — коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел природы, — гравитационная постоянная (G — буква латинского алфавита, читается «же»).

¹ Формулировка этого закона, данная самим Ньютона, отличается от приведенной здесь.

Из закона всемирного тяготения выразим гравитационную постоянную и ее единицу в СИ:

$$G = \frac{F R^2}{m_1 m_2}, \quad [G] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

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

Каков смысл гравитационной постоянной? Если масса каждого из взаимодействующих тел равна по 1 кг, а расстояние между ними равно 1 м, то $G = F$, т. е. *два тела массой по 1 кг каждое, находясь на расстоянии 1 м друг от друга, притягиваются с силой, равной $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н* (рис. 136). Это очень малое значение. Поэтому мы не замечаем притяжения между окружающими нас телами.

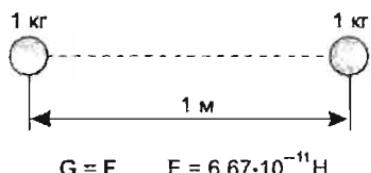


Рис. 136

❖ Постоянство гравитационной постоянной имеет глубокий смысл. Если бы в результате каких-либо процессов гравитационная постоянная уменьшилась, то уменьшилась бы сила гравитационного взаимодействия. Это означало бы, что звезды не могли бы настолько разогреться, чтобы в них начались ядерные реакции. Наоборот, в случае увеличения G ядерные реакции протекали бы так быстро, а время жизни звезды было бы так мало, что не успела бы составиться комбинация молекул, положившая начало жизни.

Закон всемирного тяготения был сформулирован и доказан на основе астрономических наблюдений. Сначала Ньютона рассмотрел движение Луны и сделал вывод, что сила, удерживающая Луну при ее движении вокруг Земли, имеет ту же природу, что и сила гравитации (тяжести), и что действие этой силы убывает как квадрат расстояния. Затем, пользуясь законами Кеплера, Ньютон доказал, что эта зависимость имеет место и при движении планет вокруг Солнца. С помощью этого закона Ньютон правильно объяснил причину морских приливов и отливов. Закон многократно позволял не только рассчитывать движение небесных тел, но и предсказывать существование неизвестных тел по их влиянию на движение известных планет и звезд. Так была обнаружена восьмая планета Солнечной системы — Нептун (1846). Ее координаты, масса были рассчитаны французским ученым Урбеном Леверье и английским ученым Джоном Адамсом с учетом «возмущений», оказываемых на планету Уран.



Рис. 137

Закон всемирного тяготения служит надежной основой для расчета движения искусственных спутников Земли и межпланетных автоматических станций.

Надо иметь в виду, что закон

всемирного тяготения достаточно точно выполняется лишь для частиц, имеющих малые размеры по сравнению с расстоянием между ними, т. е. для *материальных точек*. Силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль прямой, соединяющей эти точки (рис. 137). Подобного рода силы называются *центральными*.

По третьему закону Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Закон всемирного тяготения также *справедлив*:

1) для шарообразных тел со сферическим распределением вещества, плотность которого увеличивается к центру, находящихся на любом расстоянии друг от друга; в этом случае под R понимается расстояние между центрами взаимодействующих тел;

2) при взаимодействии сферического тела произвольного размера с телом произвольной формы небольших размеров, находящегося вблизи поверхности сферы.

Для астрономических объектов закон всемирного тяготения всегда выполняется. Однако для тел, сравнительно близких друг к другу (таких, как Земля и Луна), точные измерения обнаруживают отличие силы гравитационного притяжения от той, которая отражена в законе всемирного тяготения. Это связано с неоднородным и несферическим распределением масс.

Масса — мера гравитации. В законе всемирного тяготения проявляется другое свойство тел — свойство взаимного тяготения, и масса служит мерой тяготения. В законе всемирного тяготения *масса — мера гравитационных свойств тел* (m_r). Вводя понятие «*масса*», мы говорили: *масса — количественная мера инертности тел*. Во втором законе Ньютона масса инертная (m_i). Точные эксперименты показали, что инертная и гравитационная массы пропорциональны друг другу и их можно считать равными ($m_i \approx m_r$). Этот факт положен в основу общей теории относительности (ОТО) — теории тяготения, созданной А. Эйнштейном.

Таким образом, *масса — мера инертных и гравитационных свойств тел*.

Пример решения задачи

С какой силой Земля притягивает Луну? С какой силой Солнце притягивает Землю? Сравните силу взаимодействия систем Луна—Земля и Земля—Солнце. Радиус орбиты Луны $R_L = 3,84 \cdot 10^8$ м, радиус орбиты Земли $R_\oplus = 150$ млн км, масса Луны $m_L = 7,34 \cdot 10^{22}$ кг, масса Солнца $m_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ кг, масса Земли $m_\oplus = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг.

$F_1 - ?$ $F_2 - ?$ $F_1 \vee F_2$

$$R_{\text{Л}} = 3,84 \cdot 10^8 \text{ м}$$

$$R_{\oplus} = 150 \text{ млн км} =$$

$$= 15 \cdot 10^{10} \text{ м}$$

$$m_{\text{Л}} = 7,34 \cdot 10^{22} \text{ кг}$$

$$m_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$$

$$m_{\oplus} = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

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

Решение

Будем считать, что Луна движется вокруг Земли по круговой орбите, Земля движется вокруг Солнца также по круговой орбите. Землю, Луну и Солнце будем считать материальными точками (рис. 138, а, б).

С помощью закона всемирного тяготения рассчитаем силу F_1 — силу, действующую со стороны Земли на Луну, F_2 — силу, действующую со стороны Солнца на Землю:

$$F_1 = G \frac{m_{\text{Л}} m_{\oplus}}{R_{\text{Л}}^2}, \quad F_2 = G \frac{m_{\oplus} m_{\odot}}{R_{\oplus}^2}.$$

$$F_1 = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{7,34 \cdot 10^{22} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{(3,84 \cdot 10^8)^2} = 19,85 \cdot 10^{19} \approx 2 \cdot 10^{20} (\text{Н}),$$

$$F_2 = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{5,98 \cdot 10^{24} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{(15 \cdot 10^{10})^2} = 35,45 \cdot 10^{21} (\text{Н}).$$

$$F_2/F_1 = 177,25 \approx 177.$$

Ответ: Земля притягивает Луну с силой $2 \cdot 10^{20} \text{ Н}$, Солнце притягивает Землю с силой $35,45 \cdot 10^{21} \text{ Н}$. Притяжение Земли Солнцем в 177 раз больше притяжения Луны Землей.

Из расчетов видно, что при увеличении массы тел роль гравитационного взаимодействия возрастает. Движение небесных тел (планет, звезд, галактик) полностью определяется гравитационными силами. Поэтому и закон получил название «закон всемирного тяготения».

Система Земля—Луна. Луна — это, пожалуй, единственное небесное тело, в отношении которого с древнейших времен ни у кого не было сомнений, что оно движется вокруг Земли. На фотографии (рис. 139) вы видите Луну и Землю из космоса. Расстояние между центрами Земли и Луны составляет около 384 400 км — свыше 60 радиусов Земли. Луна сравнительно крупное тело Солнечной системы; ее диаметр почти в 4 раза меньше земного, а масса — в 81 раз.

Луна притягивается не только Землей, но и Солнцем. Ученые-астрономы считают систему Земля—

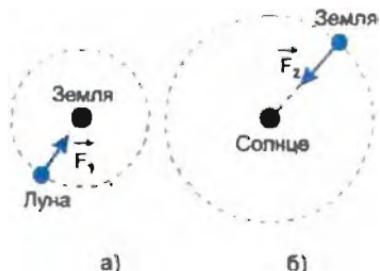


Рис. 138



Рис. 139. Земля и Луна — двойная система

Луна двойной планетой. Ведь не только Луна обращается вокруг Земли, но и Земля под действием притяжения Луны описывает небольшую орбиту вокруг общего центра масс. Только эта орбита в 81 раз меньше, чем лунная. Центр масс системы Земля—Луна находится внутри Земли на расстоянии 4750 км от центра планеты. Строго говоря, центр масс системы Земля—Луна, а не центр Земли движется по эллипсу вокруг Солнца (рис. 140).



Рис. 140

* Эксперимент Кавендиша. Один из самых точных экспериментов по измерению гравитационной постоянной был проведен в 1798 г. английским ученым Генри Кавендишем (1731–1810). Кавендиш поставил перед собой задачу измерить силу притяжения между телами известной массы.

Для измерения гравитационной постоянной Кавендишу пришлось проявить остроумие — придумать чувствительные крутильные весы. Поскольку даже слабые воздушные потоки могли исказить измерения, он разместил свою аппаратуру в ящике, ящик поставил в комнату и наблюдал за движением грузов через оптические зрительные трубы, вставленные в стены комнаты (рис. 141, а). Для освещения шаров, стержня и нити использовались свечи.

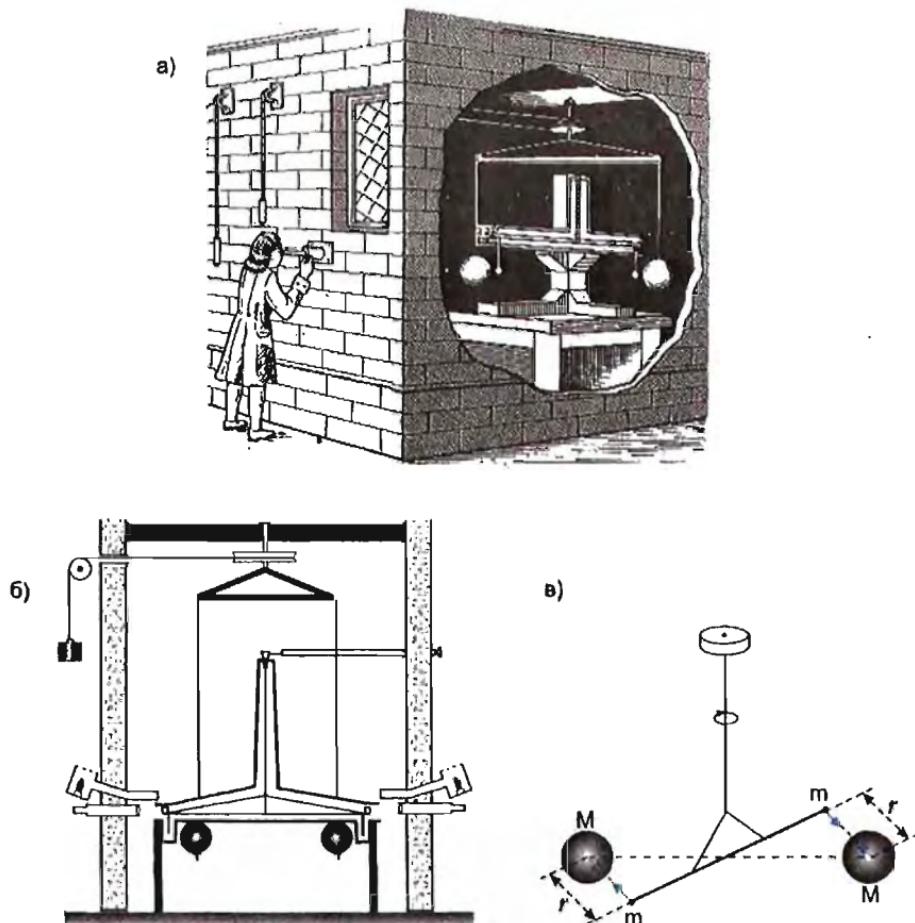


Рис. 141. Опыт Кавендиша: а) установка Кавендиша; б) крутильные весы Кавендиша (рисунок взят из работы Кавендиша); в) схема опыта Кавендиша

Кругильные весы представляли собой двухметровый стержень (коромысло) с двумя небольшими свинцовыми шарами на концах, массы шаров были известны (диаметр каждого шара 5 см, масса 775 г). Стержень подвешивался на тонкой проволоке (рис. 141, б, в). Вблизи шаров можно было помещать два больших свинцовых шара M (диаметром 20 см и массой 49,5 кг). Сила притяжения (тяготения) между двумя парами шаров заставляла небольшие шары перемещаться к большим. Это вызывало закручивание подвеса. По углу закручивания подвеса можно было определить силу, действующую между большими и малыми шарами.

По результатам эксперимента Кавендиш получил значение гравитационной постоянной, отличающейся всего лишь на 1% от принятого ныне значения. Эксперимент подтвердил справедливость закона всемирного тяготения.

? 1. С какими фундаментальными взаимодействиями вы ознакомились в §17? 2. Каков радиус действия гравитационного взаимодействия? 3. Приведите примеры проявления гравитационного поля. 4. В чем особенность гравитационного поля? 5. Как формулируется закон всемирного тяготения? 6. Какова математическая запись закона всемирного тяготения? Поясните величины, входящие в это уравнение. 7. Каковы условия применимости закона всемирного тяготения?

● 1. Используя рисунок 130, выполните следующие задания:
1) Назовите планеты Солнечной системы в порядке удаления от Солнца. На каком месте располагается Земля? 2) Составьте таблицу планет Солнечной системы и запишите расстояние от Солнца до каждой планеты (в а.е., м). Значение 1 а.е. вы можете найти в § 3 учебника «Физика, 7». 3) Какие планеты располагаются между Солнцем и Землей? 4) Какие планеты располагаются за Землей? 5) Где располагается пояс астероидов? 6) На какое расстояние от Солнца может удаляться комета Галлея?

2. Выберите правильный ответ.

Гравитационная постоянная равна $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$. Это означает, что:

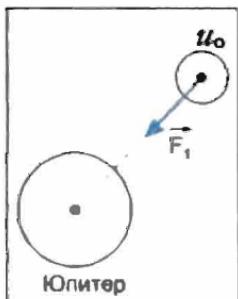
А. Два тела любой массы, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, притягиваются с силой $F = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$.

Б. Два тела массой по 1 кг, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, притягиваются с силой $F = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$.

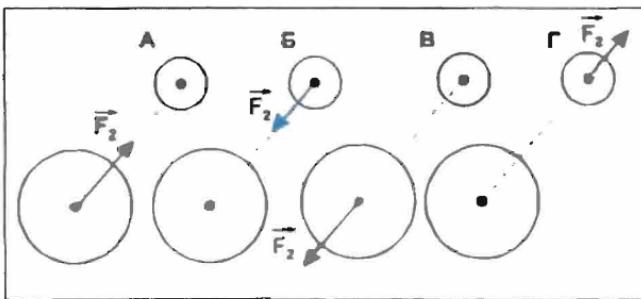
В. Два тела любой массы, находящиеся на произвольном расстоянии друг от друга, притягиваются с силой $F = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$.

3. Выберите правильный ответ.

На рисунке 142, а изображен вектор силы F_1 , с которой Юпитер действует на Ио (спутник Юпитера). На каком из рисунков – А, Б, В или Г – верно изображено направление силы, действующей со стороны Ио на Юпитер (рис. 142, б)?



в)



б)

Рис. 142

4. Выберите правильный ответ.

Сила гравитационного взаимодействия между двумя шарами массами 1 кг каждый, находящимися на расстоянии 1 м, равна F . Чему равна сила гравитационного взаимодействия между шарами массами 3 кг каждый, находящимися на таком же расстоянии друг от друга?

А. F .Б. $3F$.В. $6F$.Г. $9F$.**5. Выберите правильный ответ.**

Сила гравитационного воздействия между двумя телами массами 2 кг каждое, находящимися на расстоянии 1 м, равна F . Чему будет равна сила гравитационного взаимодействия между телами, если расстояние между ними увеличится в 5 раз?

А. F .Б. $5F$.В. $25F$.Г. $\frac{F}{25}$.

■ Чему равна сила гравитационного взаимодействия двух мальчиков массой по 50 кг, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга? Сравните полученное значение с силой гравитационного взаимодействия систем Земля–Луна и Земля–Солнце (данные возьмите из примера решения задачи). Какой вывод можно сделать?

§ 18. СИЛА ТЯЖЕСТИ

Совершенно непонятно,
Почему вода течет
Сверху вниз,
А не обратно,
Так,
А не наоборот.

P. Сеф

Сила тяжести – одно из проявлений всемирного тяготения. Вы, вероятно, обращали внимание на то, что если нет опоры, то любое тело (металлический шарик, цилиндр, лист бумаги и др.) падает вниз. Камень или мяч, брошенный горизонтально, не летит по прямой, а постепенно опускается вниз. В чем причина этого?

Любое из названных тел обладает массой и находится вблизи поверхности Земли. Вы знаете, что при взаимодействии сферического тела произвольного размера с телом произвольной формы небольших размеров, находящегося вблизи поверхности сферы, выполняется закон всемирного тяготения. Предположим, что Земля – однородный шар (т. е. плотность вещества равномерно распределена внутри шара) и мы свяжем с ней инерциальную систему отсчета (ИСО). Для двух положений тела (рис. 143) запишем закон всемирного тяготения:

$$F = G \frac{M_{\oplus} m}{R_{\oplus}^2}, \quad F = G \frac{M_{\oplus} m}{(R_{\oplus}+h)^2},$$

где M_{\oplus} – масса Земли, m – масса тела, R – расстояние от центра Земли до данного тела, R_{\oplus} – радиус Земли, h – высота тела над поверхностью Земли, G – гравитационная постоянная.

Так как $G = \text{const}$, $M_{\oplus} = \text{const}$, $R_{\oplus} = \text{const}$, то и

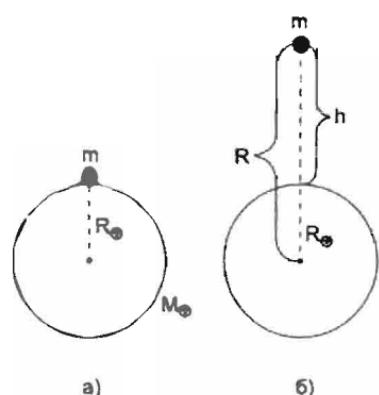


Рис. 143

$$G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = \text{const},$$

$$G \frac{M_{\oplus}}{(R_{\oplus}+h)^2} = \text{const}.$$

Обозначим эти выражения буквой латинского алфавита g (читается «жэ»). Величина g не зависит от массы тела и характеризует лишь само поле гравитации Земли.

Силу взаимодействия Земли и тела небольших размеров произвольной формы (силу гравитационного притяжения) можно рассчи-

тать по формуле $F = mg$. Выразив g , получаем $g = F/m$. Сопоставим это выражение с математической записью второго закона Ньютона: $a = F/m$. Отсюда следует, что если на тело действует только сила гравитационного притяжения, то величина g показывает, с каким ускорением двигалось бы тело под действием этой силы. Величину g называют *ускорением свободного падения*. Ускорение свободного падения является характеристикой гравитационного поля Земли. Оно численно равно силе, с которой это поле действует на тело единичной массы (1 кг).

$$\text{Выразим единицу } g \text{ в СИ: } [g] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}}{\text{кг}^2 \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} = \text{м/с}^2.$$

Сила, с которой Земля притягивает все тела, находящиеся на ней или вблизи нее, называется *силой тяжести*.

Сила тяжести — одно из проявлений силы всемирного тяготения. В векторной форме формула расчета силы тяжести имеет вид:



$$\vec{F} = m\vec{g}.$$

Сила тяжести, действующая на тело, равна произведению массы тела на ускорение свободного падения. Сила тяжести — сила гравитационной природы.

Этой формулой расчета силы тяжести удобно пользоваться тогда, когда тело находится вблизи поверхности Земли. В общем случае, когда тело находится на произвольной высоте h от поверхности Земли и ускорение свободного падения неизвестно, силу тяжести можно рассчитать с помощью закона всемирного тяготения.

Как направлена сила тяжести? Для ответа на этот вопрос выполните экспериментальное задание.

◆ Определение направления силы тяжести

Приборы и материалы: металлический (стальной, железный или др.) шарик, пластмассовый шарик, цилиндр (железный, стальной или медный), нить.

1. Подвесьте металлический шарик на нить и, держа в руках нить, поднимите шарик вертикально вверх (рис. 144). Почему нить натягивается?

2. Выпустите нить из рук и наблюдайте за падением шарика. Как движется шарик? Почему?

3. То же самое проделайте с пластмассовым шариком и металлическим цилиндром.

Что общего в движении тел?



Рис. 144

Направление нити указывает направление силы тяжести. Сила тяжести направлена вниз, к центру Земли. Поскольку масса — положительный скаляр, то направление g совпадает с направлением силы тяжести F .

К чему приложена сила тяжести? В теле сила тяжести проходит через точку, которая получила название *центр тяжести*. Центр тяжести однородного тела, имеющего центр симметрии (шар, круглая или прямоугольная пластина, цилиндр), находится в этом центре. Для определения центра тяжести какого-либо тела неправильной формы выполните экспериментальное задание.

◆ Определение центра тяжести плоской фигуры

Приборы и материалы: лист картона, отвес (груз, прикрепленный к нити), карандаш.

1. Возьмите картон и подвесьте его на гвоздь так, как показано на рисунке 145, а (размеры и конфигурацию фигуры картона выберите самостоятельно).

2. С помощью отвеса и карандаша проведите на картоне вдоль отвеса вертикальную линию через точку подвеса (рис. 145, б).

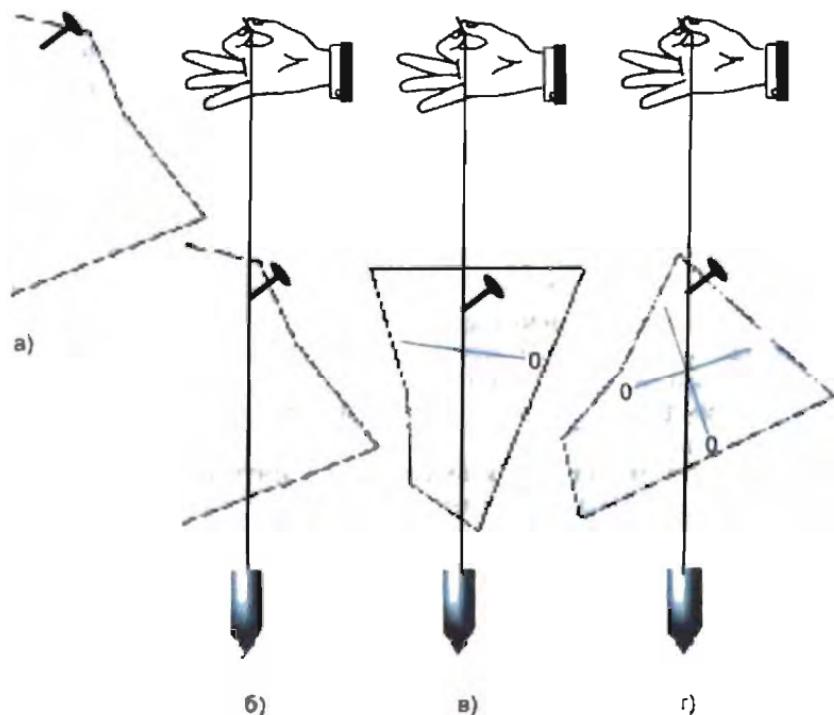


Рис. 145. Определение центра тяжести плоской фигуры

3. Подвесьте картон в какой-нибудь другой точке. С помощью отвеса и карандаша проведите на картоне еще одну вертикальную линию вдоль отвеса через точку подвеса (рис. 145, в).

4. Подвесьте картон к третьей точке. С помощью отвеса и карандаша проведите на картоне вдоль отвеса вертикальную линию через точку подвеса (рис. 145, г).

5. Точка пересечения всех вертикальных линий — центр тяжести вашей фигуры из картона. Чтобы убедиться в этом, расположите фигуру из картона в горизонтальной плоскости на ось карандаша. Будет ли фигура в равновесии?

Чему равно значение ускорения свободного падения? Если тело находится вблизи поверхности Земли ($h = 0$), то $g = G \cdot M_{\oplus} / R_{\oplus}^2$. Подставим в эту формулу числовые значения: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $M_{\oplus} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ и $R_{\oplus} \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$. Получим среднее значение для ускорения свободного падения:

$$g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6 \cdot 10^{24}}{(6,4 \cdot 10^6)^2} \approx 9,84 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Эти расчеты мы проводили, считая Землю однородным шаром, и с ним связывали ИСО. Строго говоря, g зависит от многих факторов. Главные из них — географическая широта местности, высота над уровнем моря и плотность породы в толще Земли в месте наблюдения. Планета Земля несколько сплюснута у полюсов, и расстояние от центра Земли до ее поверхности у полюсов меньше, чем на экваторе. Вместе с тем Земля вращается, и, следовательно, различные точки на ее поверхности имеют разные ускорения по отношению к ИСО, связанной с Солнцем. Это приводит к тому, что ускорение свободного падения на разных широтах различно. Эксперименты показывают, что ускорение свободного падения на полюсе равно $9,83 \text{ м/с}^2$, на экваторе — $9,78 \text{ м/с}^2$, на широте 45° — $9,81 \text{ м/с}^2$, на широте Москвы — $9,82 \text{ м/с}^2$, на широте Рима — $9,80 \text{ м/с}^2$, на широте Токио — $9,79 \text{ м/с}^2$. По этим же причинам ускорение свободного падения относительно Земли не направлено точно к ее центру.

Для определенной широты местности ускорение g одинаково для всех тел.

При решении задач для простоты расчетов будем принимать $g = 10 \text{ м/с}^2$ и считать, что оно направлено к центру Земли.

В некоторых районах Земли ускорение свободного падения отличается от приведенного выше среднего значения из-за неоднородного строения земной коры и недр, наличия горных массивов и впадин, а также залежей полезных ископаемых. Там, где имеются залежи более плотных пород (например, металлических руд), значение g больше среднего значения, а если залежи легких полезных ископаемых (нефть, газ), то g меньше среднего значения. Метод определения залежей полезных ископаемых по

измерению ускорения свободного падения используется геологами и носит название *гравиметрической разведки*.

Ускорение свободного падения на различных планетах Солнечной системы. В §17 мы обсуждали вопрос о том, что гравитационное поле Солнца «управляет» движением почти всех тел Солнечной системы. Силу тяжести, действующую на тело вблизи поверхности каждой из девяти планет Солнечной системы,

можно рассчитать по формуле $F = mg$, где $g = G \frac{M}{R^2}$ – ускорение свободного падения на планете; M – масса планеты; R – радиус планеты. Так как массы и радиусы планет известны, то можно подсчитать ускорение свободного падения на каждой из них.

В таблице 7 приведены массы планет Солнечной системы и значения ускорения свободного падения на экваторе.

Т а б л и ц а 7

| Планета Солнечной системы | Масса (относительно массы Земли) | Ускорение свободного падения g , м/с ² |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Меркурий | 0,055 | 3,70 |
| Венера | 0,816 | 8,76 |
| Земля | 1,0 | 9,78 |
| Марс | 0,107 | 3,76 |
| Юпитер | 318 | 23,50 |
| Сатурн | 95,2 | 9,06 |
| Уран | 14,5 | 9,80 |
| Нептун | 17,1 | 13,47 |
| Плутон | 0,002 | 0,6 (значение неточное) |

Проанализируем некоторые табличные данные. Самая массивная из планет – Юпитер. Его масса в 318 раз больше массы Земли, а ускорение свободного падения в 2,4 раза больше, чем на Земле. Это означает, что одно и то же тело к Юпитеру притягивается в 2,4 раза сильнее, чем к Земле. Масса Меркурия приблизительно в 18 раз меньше массы Земли, и у поверхности Меркурия тело притягивается примерно в 2,6 раза слабее, чем на Земле.

Луна – естественный спутник Земли – имеет массу примерно в 81 раз меньше земной. Ускорение свободного падения на

поверхности Луны составляет $1,623 \text{ м/с}^2$, т. е. в 6 раз меньше, чем на Земле. Это означает, что сила притяжения, действующая на одно и то же тело на поверхности Луны, в 6 раз меньше силы притяжения, действующей на поверхности Земли. Подсчитаем силу притяжения, действующую на спортивный молот массой 7,25 кг, к Земле и Луне. Используя формулу расчета силы тяжести $F = mg$, получаем силу притяжения на поверхности Земли примерно 72,5 Н, а на поверхности Луны примерно 11,8 Н, т. е. на Луне сила притяжения, действующая на молот, в 6 раз меньше, чем на Земле.

Примеры решения задач

Задача 1. Высочайшая вершина на Земле в Гималаях — Эверест (8848 м). Сравните значение ускорения свободного падения на Эвересте с ускорением свободного падения на уровне моря. Радиус Земли примите равным 6400 км.

$$g_1 \vee g_2$$

$$h_1 = 8848 \text{ м}$$

$$h_2 = 0$$

$$R_{\oplus} = 6400 \text{ км} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

Решение

На уровне моря высота земной поверхности принимается равной нулю. Применим формулу расчета ускорения свободного падения для вершины Эверesta и для уровня моря.

$$\text{На вершине Эвереста: } g_1 = G \frac{M_{\oplus}}{(R_{\oplus}+h_1)^2}.$$

$$\text{На уровне моря: } g_2 = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}.$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{GM_{\oplus}R_{\oplus}^2}{(R_{\oplus}+h_1)^2GM_{\oplus}} = \frac{R_{\oplus}^2}{(R_{\oplus}+h_1)^2};$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{(6,4 \cdot 10^6)^2}{(6,4 \cdot 10^6 + 8848)^2} = \frac{(6,4 \cdot 10^6)^2}{(6\ 408\ 848)^2} = 0,997.$$

$$g_1 = 0,997 g_2,$$

$$g_2 - g_1 = 0,003 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: ускорение свободного падения на вершине Эвереста меньше, чем на уровне моря, на $0,003 \text{ м/с}^2$.

Задача 2. Если динамометр расположен на полюсе Земли в точке 1, то указатель устанавливается у деления 10 Н (рис. 146). Где установится указатель динамометра, если его поместить в точке 2, расположенной на высоте, равной радиусу Земли? Ответ обоснуйте.

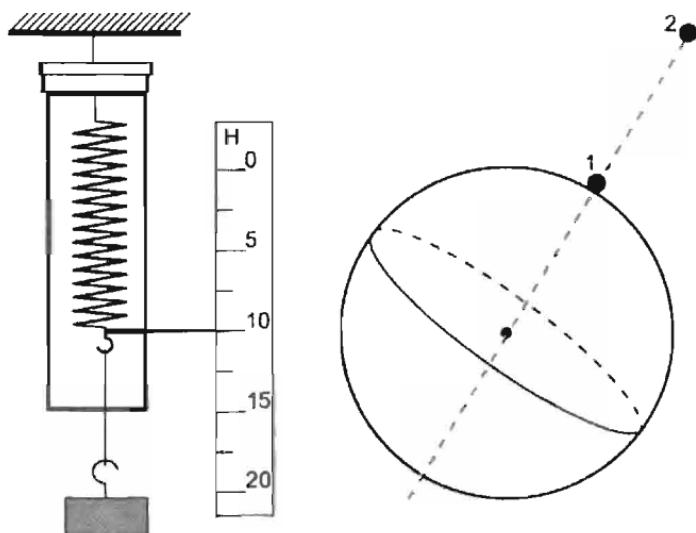


Рис. 146

| | |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F_1 \vee F_2$ $F_1 = 10 \text{ H}$ $h = R_{\oplus}$ | Решение $F_1 = G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}, \quad F_2 = G \frac{mM_{\oplus}}{4R_{\oplus}^2};$ $\frac{F_2}{F_1} = \frac{R_{\oplus}^2}{4R_{\oplus}^2} = 1/4, \quad F_2 = F_1/4, \quad F_2 = 2,5 \text{ H}.$ |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Ответ: указатель динамометра установится у деления 2,5 Н.

Космические скорости. Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может стать ее искусственным спутником, называется первой космической скоростью. Искусственным спутником Земли может быть тело любой массы. Важно, чтобы ему сообщили в горизонтальном направлении первую космическую скорость; при этом оно будет двигаться по окружности вокруг Земли (рис. 147).

Подсчитаем значение первой космической скорости. Движение спутников Земли происходит под действием только одной силы — силы всемирного тяготения, сообщающей спутнику и всем предметам, находящимся в нем, одинаковые ускорения. Применим второй закон Ньютона: $\sum \vec{F} = m\vec{a}$. Силу рассчитаем по закону всемирного тяготения, а ускорение — по формуле расчета нормального (или центростремительного) ускорения:

$$F = G \frac{M_{\oplus}m}{(R_{\oplus}+h)^2}, \quad a_n = \frac{v^2}{(R_{\oplus}+h)},$$

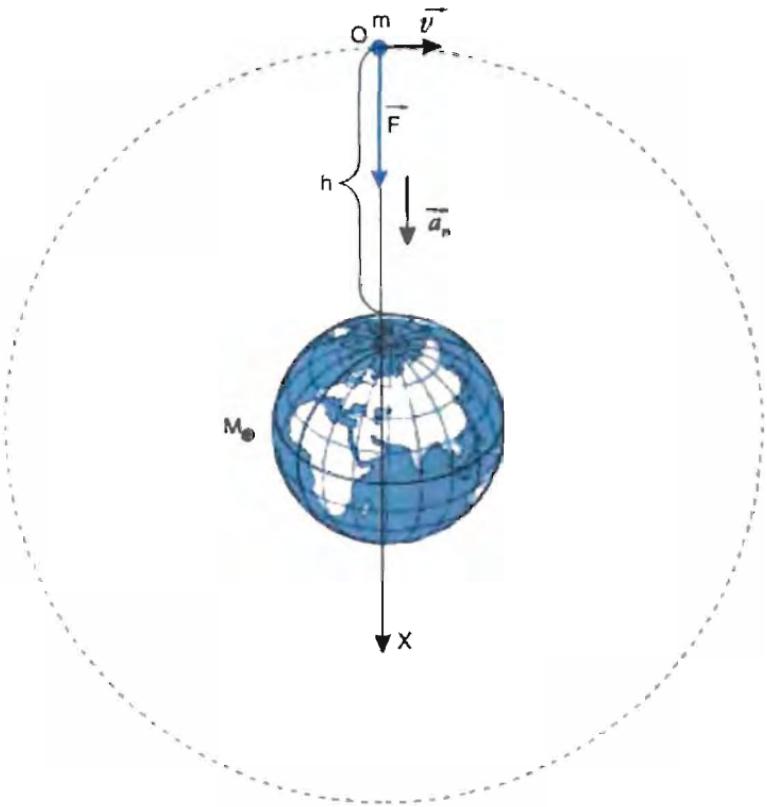


Рис. 147. Схема кругового движения искусственного спутника

где m – масса тела (спутника Земли); M_{\oplus} – масса Земли; R_{\oplus} – радиус Земли; h – высота от поверхности Земли до спутника.

Уравнение движения спутника запишем в виде

$$G \frac{M_{\oplus} m}{(R_{\oplus} + h)^2} = m \frac{v^2}{(R_{\oplus} + h)} .$$

После преобразований получаем

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}} .$$

Эта формула позволяет рассчитать первую космическую скорость на любой высоте h над поверхностью Земли.

Если можно пренебречь высотой h в сравнении с радиусом Земли, то первая космическая скорость может быть рассчитана по формуле

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}}$$

Подставим значения G , M_{\oplus} и R_{\oplus} в формулу расчета, получим числовое значение первой космической скорости (для экватора).

На уровне моря ($h = 0$):

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6378 \cdot 10^3}} = 7,92 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,92 \text{ км/с.}$$

На высоте $h = 200$ км:

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(6378 + 200) \cdot 10^3}} = 7,80 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,80 \text{ км/с.}$$

На высоте $h = 300$ км:

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(6378 + 300) \cdot 10^3}} = 7,74 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,74 \text{ км/с.}$$

Расчеты показывают, что значение первой космической скорости убывает с увеличением высоты над уровнем моря.

Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может преодолеть земное притяжение и осуществить полет к другим планетам Солнечной системы, называется второй космической скоростью.

Вторая космическая скорость также убывает с увеличением высоты. Так, на уровне моря ($h = 0$) $v = 11,18$ км/с, на высоте $h = 200$ км $v = 11,01$ км/с.

Скорость, при достижении которой космический аппарат, запускаемый с Земли, может преодолеть притяжение Земли и Солнца и уйти в межзвездное пространство, называется третьей космической скоростью. На уровне моря она составляет 16,67 км/с.

Если скорость тела (космического аппарата) равна первой космической скорости $v \approx 7,9$ км/с и направлена параллельно поверхности Земли, то тело становится искусственным спутником Земли, движущимся по круговой орбите на сравнительно небольшой высоте над уровнем моря. При скорости v , принимающей значения между 7,9 и 11,1 км/с, орбита тела (космического аппарата) будет эллиптической. При скорости $v \approx 11,2$ км/с тело будет двигаться по параболе, а при большей скорости — по гиперболе и уйдет в межзвездное пространство (рис. 148).

* Первый в мире искусственный спутник Земли был запущен в СССР 4 октября 1957 г. Он имел форму шара радиусом 58 см. Масса спутника была равна 83,6 кг. Спутник двигался по эллиптической орбите: в перигее (самая ближняя точка орбиты) высота от поверхности Земли составляла 228 км, а в апогее (самая удаленная точка орбиты) — 947 км. Спутник проработал 92 сут., совершив около 1400 оборотов вокруг Земли. Пройденный путь по орбите составил примерно 60 млн км.

? 1. В эпиграфе к § 18 приведен фрагмент стихотворения Р. Сефа «Совершенно непонятно, почему...». Как бы вы ответили на вопрос поэта? 2. Какую силу называют силой тяжести? 3. Запишите формулу расчета силы тяжести. Поясните величины, входящие в эту формулу. Назовите единицу каждой величины. 4. К какому виду взаимодействия может быть отнесена сила тяжести? 5. К чему приложена и как направлена сила тяжести? 6. Каким прибором можно измерить силу тяжести, действующую на тело? 7. Чему равно среднее значение ускорения свободного падения? Какие допущения мы использовали, рассчитывая g ? 8. От чего зависит значение g ? Ответ обоснуйте. 9. Что можно сказать о значении g для данной широты местности? Приведите пример. 10. Какое естественное небесное тело движется под действием той же силы, что и искусственные спутники Земли?

● 1. Выберите правильный ответ.

На расстоянии R_{\oplus} от центра Земли на тело действует сила тяжести F . Чему будет равна сила тяжести, действующая на тело на расстоянии $4R_{\oplus}$ от центра Земли?

- A. F . B. $4F$. C. $F/4$. D. $F/16$.

2. С помощью пружины мы можем сравнить гравитационное притяжение Земли, действующее на различные тела (рис. 149). Используя рисунок, выполните следующие задания: 1) Сравните силы тяжести, действующие на тела. 2) Сравните массы тел.

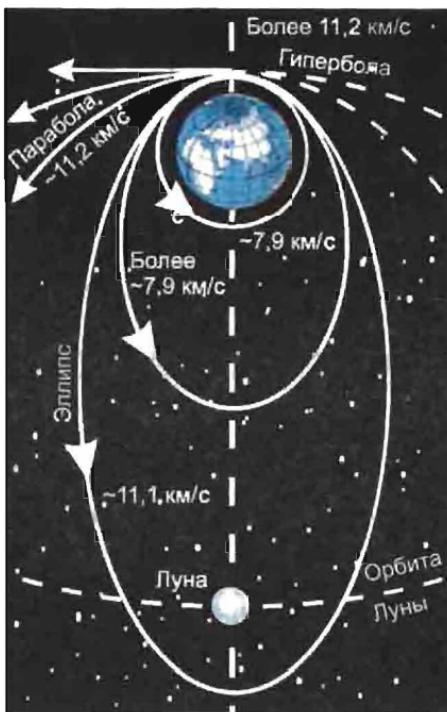


Рис. 148. Космические скорости и типы орбит

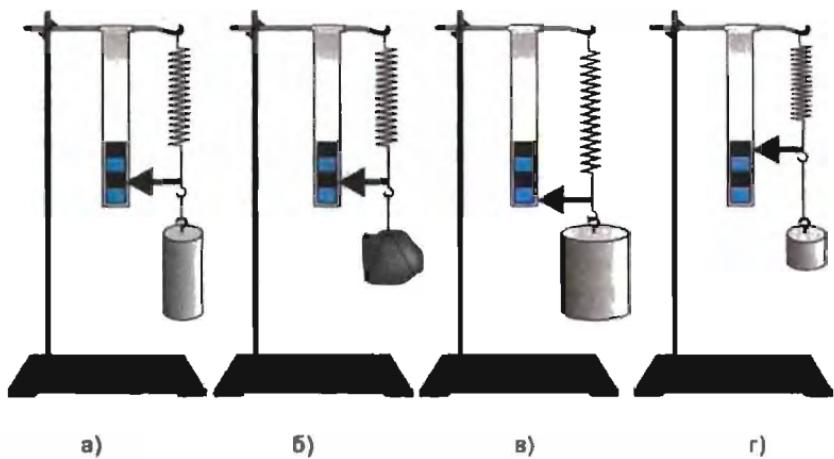


Рис. 149. Сравнение гравитационного притяжения Земли, действующего на различные тела

3) Укажите точку приложения, направление и модуль силы тяжести, действующей на каждое из тел. Масштаб: 1 деление = 2 Н.

3. Рассчитайте значение силы тяжести, действующей на тело массой 50 кг. Результаты вычислений запишите в таблицу. Необходимые данные вы найдете в параграфе (с. 130).

Таблица 8

| Место на Земле | Ускорение свободного падения g , $\text{м}/\text{с}^2$ | Сила тяжести F , Н |
|-------------------|----------------------------------------------------------|----------------------|
| Полюс | | |
| Широта 45° | | |
| Экватор | | |
| Москва | | |
| Рим | | |
| Токио | | |

* 4. Какая сила тяжести действовала бы на тело массой 100 кг вблизи поверхности планет Меркурий и Нептун? Необходимые дополнительные данные вы найдете в таблице 7 (с. 130).

* 5. Масса аппарата «Луна-16», доставившего на Землю образцы лунного грунта, равнялась 5 727 кг. Сравните силу притяжения его к Земле и Луне.

■ 1. На тело, находящееся на поверхности Земли, действует сила тяжести 75 Н. Чему равна масса тела?

2. Чему равна сила тяжести, действующая на первый в мире искусственный спутник Земли массой 83,6 кг, если он находится в апогее на высоте 947 км над поверхностью Земли¹?

3. Рассчитайте первую космическую скорость искусственного спутника Земли, находящегося на высоте 1700 км от поверхности Земли. Ответ обоснуйте. Решение сопроводите рисунком.

✳ 4. Чему равна первая космическая скорость для Луны? Радиус Луны равен 1700 км, масса — $7,35 \cdot 10^{22}$ кг. Сравните первую космическую скорость тела вблизи поверхности Луны и Земли.

5. Искусственный спутник обращается по круговой орбите на высоте 600 км над поверхностью Земли, имея скорость 7,7 км/с. Каков период обращения спутника вокруг Земли?

✳ 6. Если динамометр расположен на полюсе Земли в точке 1, то указатель устанавливается у деления 5 Н (рис. 150). Где установился бы указатель динамометра, если его вместе с грузом поместили бы на полюсе Юпитера? Необходимые данные вы можете найти в таблице 7 и в тексте параграфа.

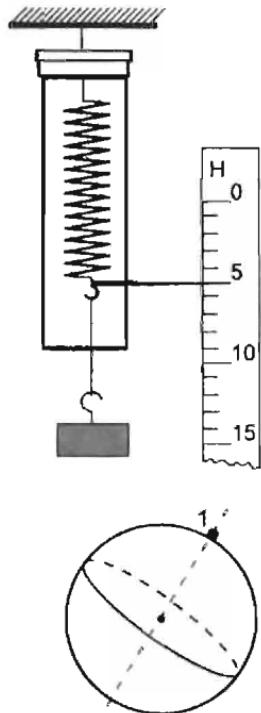


Рис. 150

◆ 1. Измерение силы тяжести, действующей на тело

Приборы и материалы: динамометр, цилиндр (железный, стальной и др.), тело неправильной формы.

1. Определите нижний и верхний пределы измерения динамометра, цену деления и инструментальную погрешность прибора.

2. Подвесьте к крючку динамометра цилиндр. Запишите значение силы тяжести, действующей на тело, с учетом инструментальной погрешности прибора.

3. Подвесьте к крючку динамометра тело неправильной формы. Запишите значение силы тяжести, действующей на тело, с учетом инструментальной погрешности прибора.

4. Выполните схематический рисунок и укажите точку приложения, направление и модуль силы тяжести, действующей на цилиндр или тело неправильной формы. Масштаб выберите самостоятельно.

2. Определение связи между силой тяжести и массой тела

Приборы и материалы: динамометр, набор грузов по механике.

¹Здесь и далее массу Земли считать равной $6 \cdot 10^{24}$ кг, радиус Земли — 6400 км.

1. Подвесьте поочередно к динамометру тела массой 100 г, 200 г и т. д.

2. Результаты измерений запишите в таблицу.

| | | | | |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| m , кг | $0,1 \pm 0,002$ | $0,2 \pm 0,002$ | $0,3 \pm 0,002$ | $0,4 \pm 0,002$ |
| F , Н | | | | |

3. Используя табличные данные, постройте график зависимости силы тяжести от массы тела $F = F(m)$. Масштаб выберите самостоятельно.

*** 4.** Подсчитайте значение коэффициента пропорциональности между F и m . С какой величиной он совпадает?

§ 19. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Закон Галилея. Жизненный опыт подсказывает, что всякое тело, если его ничто не поддерживает, падает на поверхность Земли. Проведем опыт. Возьмем два одинаковых листа бумаги, одновременно выпустим их из рук с одинаковой высоты. Они практически одновременно упадут на поверхность стола или пола. Изменим ситуацию: один из листов бумаги скомкаем, затем оба одновременно выпустим из рук с одинаковой высоты. Скомканный лист бумаги упадет на поверхность стола или пола быстрее, чем нескомканный лист бумаги. Поскольку масса обоих листов бумаги одинаковая, следовательно, на их движение оказывает влияние сопротивление воздуха.

Возьмем разные предметы (мяч, ключ, монету, ластик, спичку, небольшой кусочек ваты, лист бумаги и др.) и попарно будем выпускать их из рук. Мы приедем к выводу, что время падения легких предметов (кусочка ваты, листа бумаги и др.) больше, чем более тяжелых (ключа, монеты и др.). Как вы объясните



Галилео Галилео (1564 — 1642) — итальянский физик и астроном. Оказал значительное влияние на развитие научной мысли. В научном труде «Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевской и Коперниковой» (1632) отставил учение Н. Коперника о гелиоцентрической системе мира. Сформулировал для принципа механики: принцип относительности для равномерного прямолинейного движения и принцип постоянства ускорения свободного падения. В книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, механики и законов падения» (1638) обобщил открытия в механике: свободное падение тел, качение маятников, прочность механизмов, равноускоренное движение и др. От Галилея ведет свое начало динамика. В нем гармонично сочетались талант физико-теоретика и мастерство экспериментатора.

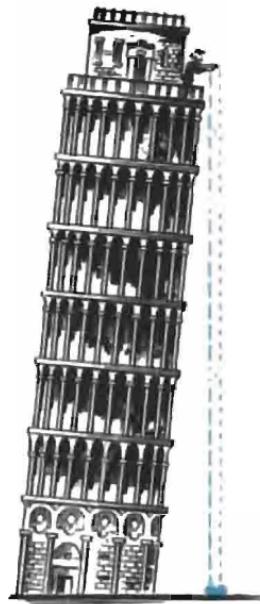
результаты опыта? Наиболее вероятно такое объяснение: время падения зависит от массы тела — чем больше масса тела, тем быстрее оно падает. Так думал и древнегреческий ученый Аристотель (IV в. до н. э.), считая, что более тяжелые тела падают быстрее легких. Взгляды Аристотеля казались настолько очевидными, что на протяжении почти восемнадцати столетий никто не подвергал их сомнению.

Усомнился в правильности выводов Аристотеля итальянский ученый Галилео Галилей. Согласно легенде, в 1583 г. Г. Галилей проводил самые первые опыты по сбрасыванию тяжелых шаров одинакового диаметра, но разной массы с падающей башни в итальянском городе Пизе (рис. 151). Английский физик Оливер Лодж так описывает эту легенду: «В одно прекрасное утро в присутствии всего университета он поднялся на известную падающую башню, взяв с собой два ядра: стофунтовое и однофунтовое¹. Он установил их на краю башни и отпустил оба одновременно. Они полетели вместе и вместе же достигли земли. Глухой удар падающих ядер о землю прозвучал как похоронный звон над старой системой физики и возвестил о зарождении новой».

На упрек одного из сторонников учения Аристотеля в том, что, говоря об одновременном падении шаров, Галилей искаивает истину, ученый ответил: «Проделав опыт, вы найдете, что больший опередит меньший на два пальца, так что когда больший упадет на землю, то меньший будет от нее



а)



б)

Рис. 151. а) Ажурная Пизанская башня была невольным свидетелем опытов Г. Галилея; б) схема опыта Галилея

¹Фунт (английский торговый) примерно равен 453,6 г.

на расстоянии толщины двух пальцев. Этими двумя пальцами вы хотите закрыть девяносто девять локтей Аристотеля и, говоря о моей небольшой ошибке, умалчиваете о громадной ошибке другого... Причина различной скорости падения тел различного веса не заключается в самом их весе, а обусловливается внешними причинами — главным образом сопротивлением среды, так что если бы устраниТЬ последнее, то все тела падали бы одинаково быстро».

Наблюдая падения разных тел (пушечного ядра, мушкетной пули и др.), Галилей открыл один из важнейших законов механики, который носит его имя: **все тела под действием земного тяготения падают на Землю с одинаковым ускорением**.

В справедливости закона Галилея можно убедиться на опыте с так называемой трубкой Ньютона. В XVI в. Галилею осуществить опыты в безвоздушном пространстве было невозможно, так как еще не существовали воздушные насосы. А вот в эпоху И. Ньютона они уже были сконструированы. Ньютон провел эксперимент, подобный которому можем выполнить и мы. Трубка Ньютона — толстая стеклянная трубка длиной около 1 м, запаянная с одного конца и имеющая крышку с краном с другого (рис. 152). Внутри трубки находятся птичье перышко, пробка и кусочек свинца. Быстро перевернем трубку вниз дном. Все три тела упадут на дно трубки, но в разное время: сначала слышен

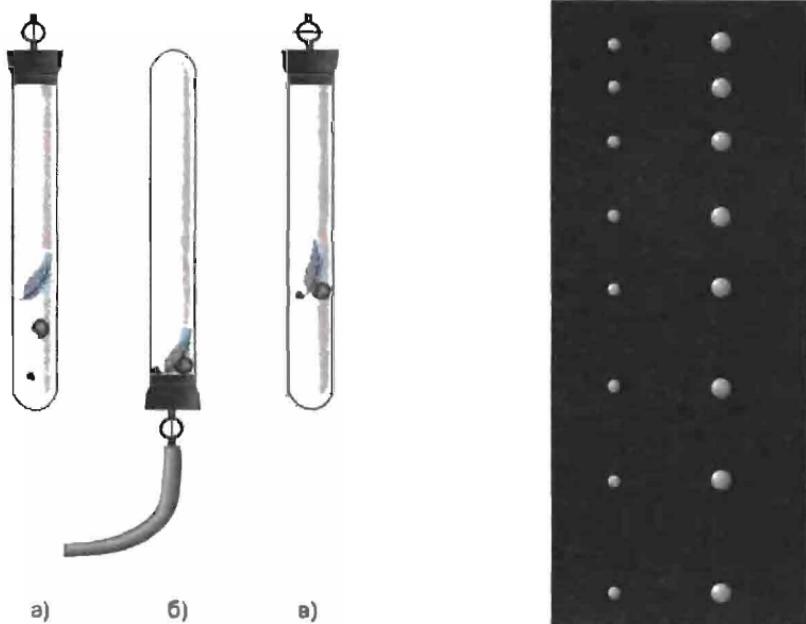


Рис. 152. Опыты с трубкой Ньютона

Рис. 153. Стробоскопическая фотография движения двух шаров различной массы

удар кусочка свинца, затем падает пробка и медленно опускается перышко (рис. 152, а). В такой последовательности падают тела, когда в трубке есть воздух. С помощью насоса откачаем воздух из трубки (рис. 152, б) и кран трубки закроем. Сняв резиновый шланг, перевернем трубку. Слышим стук кусочка свинца и наблюдаем одновременное с ним падение перышка и пробки (рис. 152, в). Одновременное падение тел в разреженном воздухе (в вакууме) доказывает, что тела падают с одинаковым ускорением, равным ускорению свободного падения g .

Падение тел в вакууме под действием только гравитационного поля Земли называется свободным падением.

О важности закона Галилея говорит тот факт, что равенство ускорений при падении тел проверяется непрерывно и со все возрастающей точностью в течение почти четырех столетий. Так, в середине XIX в. точность измерения g составила 10^{-4} . В 1912 г. венгерский ученый Р. Эйтвеш проверил равенство ускорений свободного падения с точностью до 10^{-6} , в 1970–1971 гг. советский физик В. Б. Брагинский проверил справедливость закона Галилея с точностью до 10^{-12} .

При падении тел в воздухе на их движение влияет сопротивление воздуха (этот вопрос подробнее рассмотрим в § 23). Поэтому ускорение тел не равно g . Но когда движутся сравнительно массивные тела с небольшими скоростями (камень, спортивный молот или спортивное ядро и др.), сопротивление воздуха влияет незначительно, и движение тел можно рассматривать как свободное падение. При больших скоростях (например, полет снаряда, пули и т. д.) сопротивлением воздуха уже пренебречь нельзя: оно существенно влияет на движение тел.

Каков характер движения тела при его свободном падении? С помощью современных технических средств гипотеза Галилея о падении тел может быть проверена с высокой степенью точности. На рисунке 153 приведен результат эксперимента с использованием стробоскопического метода: два шарика различной массы падают с одинаковыми скоростями, за одинаковое время движения проходят равные пути.

На рисунке 154 приведена стробоскопическая фотография свободного падения одного шарика. Слева на рисунке показана линейка, а справа – пять положений шарика. Фотография получена при освещении с интервалом 0,01 с. Анализ рисунков 153 и 154 дает основание считать движение тел равноускоренным, поскольку

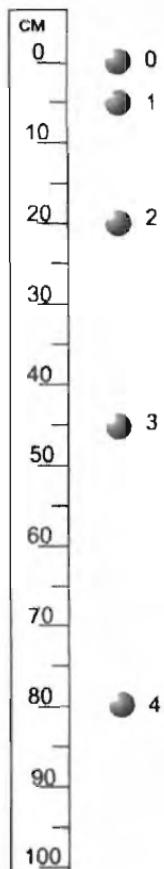


Рис. 154. Свободное падение шарика

за равные промежутки времени тела совершают разные перемещения. Докажем или опровергнем наши предположения.

Изучим по фотографии (см. рис. 154) движение шарика. Используя данные рисунка и указание об интервалах времени осуществления движения шарика, составим таблицу.

| Положение | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|---|------|------|------|------|
| $t, \text{ с}$ | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
| $s, \text{ см}$ | 0 | 5 | 20 | 45 | 80 |

Предположим, что шарик движется равноускоренно без начальной скорости ($v_0 = 0$). При равноускоренном движении путь рассчитывается по формуле $s = at^2/2$. Поскольку при свободном падении $a = g$, то $s_1 = gt_1^2/2$, $s_2 = gt_2^2/2$, $s_3 = gt_3^2/2$ и $s_4 = gt_4^2/2$. Значит, отношение пройденных путей при равноускоренном движении будет равно $s_1 : s_2 : s_3 : s_4 = t_1^2 : t_2^2 : t_3^2 : t_4^2$.

Найдем отношение пройденных путей для нашего случая:

$$5 : 20 : 45 : 80 = 1 : 4 : 9 : 16 = 1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2.$$

Отношение квадратов времени:

$$(0,01)^2 : (0,02)^2 : (0,03)^2 : (0,04)^2 = 1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2.$$

Сравнивая отношения пройденных путей и квадратов времени, убеждаемся в том, что *свободное падение – равноускоренное движение*.

При изучении свободного падения тел мы также решаем основную задачу механики – определяем положение тела в любой момент времени, т. е. рассчитываем его координаты. С целью упрощения решения основной задачи механики будем соблюдать несколько допущений.

1. Систему отсчета, связанную с Землей, будем считать инерциальной.

2. На тело действует только сила тяжести, которая сообщает ему ускорение, равное ускорению свободного падения. На всем участке движения тела ускорение будем считать одинаковым и по модулю равным $g \approx 10 \text{ м/с}^2$.

3. Перемещения тел будем считать намного меньше радиуса Земли. Так как движение тел рассматривается вблизи поверхности Земли, то поверхность Земли можно считать плоской.

4. Движение тел вблизи поверхности Земли происходит с небольшими скоростями, поэтому воздух не оказывает заметного влияния на их движение, т. е. сопротивлением воздуха пренебрегаем.

5. Если нет специальных оговорок, то начальную скорость тела будем считать равной нулю ($v_0 = 0$).

Пример решения задачи

С крыши дома отрывается сосулька. Какова высота дома, если сосулька упала на землю через 2,5 с после начала падения? Чему равна скорость сосульки в момент касания поверхности земли?

$$h = ? \quad v = ?$$

$$t = 2,5 \text{ с}$$

$$v_0 = 0$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

Решение

В любой точке траектории на сосульку действует сила тяжести, которая сообщает ей ускорение $a = g$ (рис. 155).

Для описания движения сосульки введем ИСО: точку отсчета (*t*, *O*) совместим с начальным положением сосульки; положительное направление координатной оси *OY* укажем по направлению действия силы тяжести.

Запишем в векторной форме уравнения движения тела, определяющие перемещение и скорость:

$$\begin{cases} \vec{s} = \vec{v}_0 t + \vec{a} t^2 / 2, \\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} t. \end{cases}$$

Так как до отрыва с крыши дома сосулька покоялась, то $v_0 = 0$. Тогда в проекциях на координатную ось *OY* уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} y = h = gt^2 / 2, \\ v = gt. \end{cases}$$

Проверим единицы *h* и *v*:

$$\begin{aligned} [h] &= \text{м/с}^2 \cdot \text{с}^2 = \text{м}, \quad h = 10/2 \cdot 6,25 = \\ &= 31,25 \text{ (м)}, \\ [v] &= \text{м/с}^2 \cdot \text{с} = \text{м/с}, \quad v = 10 \cdot 2,5 = \\ &= 25 \text{ (м/с)}. \end{aligned}$$

Ответ: высота дома 31,25 м, скорость сосульки в момент касания поверхности земли равна 25 м/с.

Движение тела, брошенного вертикально вверх. На рисунке 156, а приведена фотография стробоскопической съемки движения тела, брошенного вертикально вверх с некоторой начальной скоростью. На фотографии видно, что тело постепенно уменьшает свою скорость и в некоторой точке траектории останавливается. Достигнув наивысшей точки подъема, тело начнет падать, проходя те же положения, что и при подъеме (рис. 156, а, б).

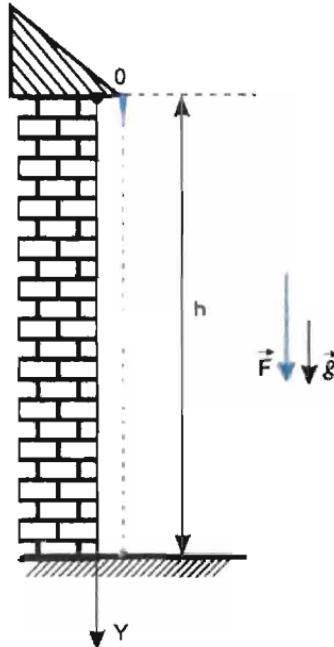


Рис. 155. Падение сосульки

Ранее мы доказали, что при свободном падении тело движется равноускоренно. Поэтому для описания движения тела вверх и вниз можем воспользоваться уравнениями кинематики:

$$\begin{cases} \vec{s} = \vec{v}_0 t + \vec{a} t^2 / 2, \\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} t, \\ v^2 - v_0^2 = 2 \vec{a} \cdot \vec{s}. \end{cases}$$

Поскольку движение прямолинейное, то положительное направление координатной оси OY укажем по направлению начальной скорости шарика \vec{v}_0 (рис. 156, б). Запишем уравнения движения в проекции на координатную ось OY .

Движение вверх:

$$y = y_0 + v_0 t_1 - g t_1^2 / 2.$$

Но $y_0 = 0$, t_1 — время подъема тела до наивысшей точки, $y = h$.

Значит, $h = v_0 t_1 - g t_1^2 / 2$, $v = v_0 - g t_1$. Но $v = 0$, так как тело в наивысшей точке подъема останавливается.

Поэтому $0 = v_0 - g t_1 \Rightarrow$

$$\Rightarrow t_1 = v_0 / g.$$

Тогда $h = v_0 \cdot v_0 / g - g / 2 \cdot v_0^2 / g^2 \Rightarrow$
 $\Rightarrow h = v_0^2 / g - v_0^2 / 2g \approx$

$$\Rightarrow h = v_0^2 / 2g -$$

формула расчета максимальной высоты подъема тела.

Другой вывод формулы расчета максимальной высоты подъема тела: $v^2 - v_0^2 = 2 \vec{a} \cdot \vec{s}$. Так как $v = 0$, $a = g$, $s = h$, то $-v_0^2 = -2gh \Rightarrow$

$$\Rightarrow h = v_0^2 / 2g$$

*Свободное падение тела
Воспользуемся уравнениями*

$$\begin{cases} \vec{s} = \vec{v}_0 t + \vec{a} t^2 / 2, \\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} t. \end{cases}$$

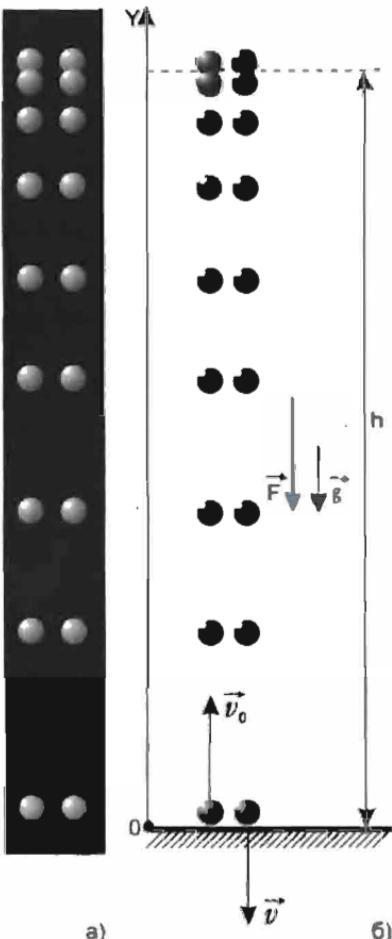


Рис. 156. Движение тела, брошенного вертикально вверх: а) стrobоскопическая фотография; б) схематический рисунок

Так как $y_0 = h$, $y = 0$ — в момент касания поверхности земли, $a = g$, $v_0 = 0$, то $0 = h - gt_2^2/2 \Rightarrow gt_2^2/2 = h \Rightarrow h = gt_2^2/2$, где t_2 — время падения тела; $-v = -gt_2 \Rightarrow t_2 = v/g$.

Подставив время t_2 в формулу для расчета h , получаем

$$h = g/2 \cdot v^2/g^2 \Rightarrow h = v^2/2g.$$

Поскольку высота h одна и та же, то $v_0^2/2g = v^2/2g \Rightarrow v_0^2 = v^2 \Rightarrow v = v_0$.

Это означает, что в момент достижения поверхности земли модуль скорости тела равен модулю начальной скорости.

Поэтому $t_2 = v_0/g \Rightarrow t_2 = t_1$, т. е. время падения равно времени подъема.

• Таким образом, при движении тела, брошенного вертикально вверх:

- 1) тело движется вверх и вниз равноускоренно: $a = g$;
- 2) время подъема тела равно времени падения;
- 3) в момент достижения поверхности земли модуль скорости тела равен модулю начальной скорости.

Пример решения задачи

Мяч брошен вертикально вверх со скоростью 20 м/с. Напишите уравнение движения тела $y = y(t)$. Через какой промежуток времени мяч будет на высоте 20 м?

$$y = y(t), t = ?$$

$$v_0 = 20 \text{ м/с}$$

$$h = 20 \text{ м}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

Решение

Воспользуемся уравнением $\vec{s} = \vec{v}_0t + \vec{a}t^2/2$. В проекции на координатную ось OY (рис. 157) получаем $y = v_0t - gt^2/2$, или $y = 20t - 5t^2$.

Так как $y = h$, то $20 = 20t - 5t^2 \Rightarrow 4 = 4t + t^2 = 0 \Rightarrow t^2 - 4t + 4 = 0$.

Дискриминант $D = 0$, значит, $t = 2$ с.

Ответ: уравнение движения мяча $y = 20t - 5t^2$, м; через 2 с после начала движения мяч оказался на высоте 20 м.

- ? 1. Какое движение называется свободным падением тел? 2. Какова формулировка закона Галилея, сделанная им на основе анализа падения различных тел? 3. В чем причина противоречия между выводом Галилея о свободном падении тел и повседневным опытом? 4. Какие выводы вы можете сделать из анализа результатов опыта с трубкой Ньютона? 5. Каков характер движения тела при его свободном падении? 6. Какие выводы можно сделать из анализа движения тела, брошенного вертикально вверх?

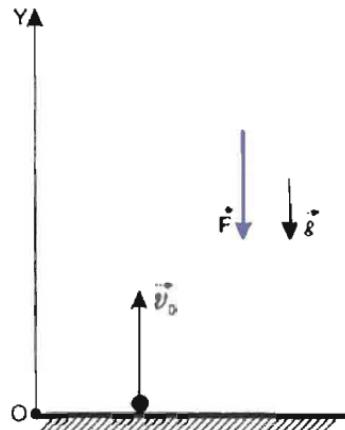
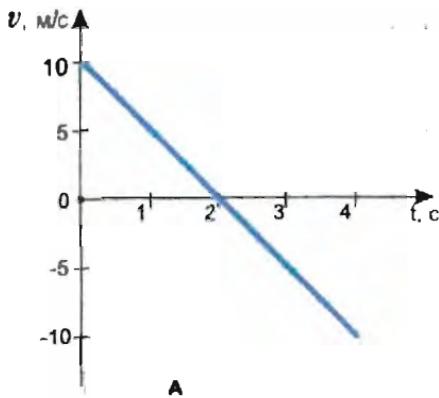
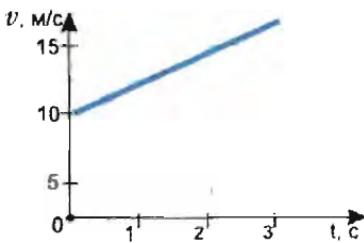


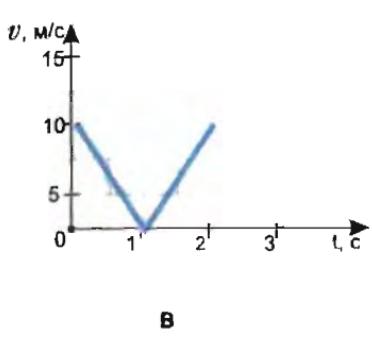
Рис. 157



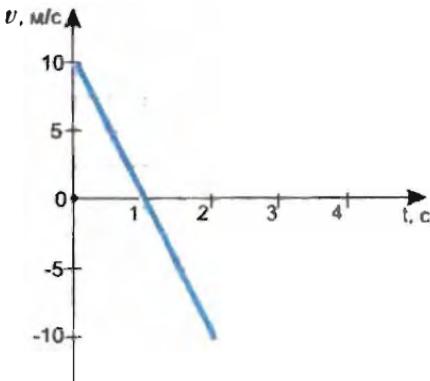
A



Б



В



Г

Рис. 158

● Выберите правильный ответ.

Тело брошено вертикально вверх со скоростью 10 м/с. Какой вид – А, Б, В или Г – имеет график зависимости скорости движения данного тела от времени (рис. 158)? Ответ обоснуйте.

■ 1. Девочка, находящаяся на балконе, случайно выронила теннисный мяч. Высота падения мяча 15 м. Какую скорость будет иметь мяч в момент касания поверхности земли?

2. Стрела, пущенная вертикально вверх со скоростью 40 м/с, попала в цель через 2 с. На какой высоте находилась цель и какова была скорость стрелы при попадании ее в цель?

3. Тело, брошенное вертикально вверх, вернулось в точку бросания через 10 с. Какова начальная скорость тела? На какую высоту оно поднималось? Решение сопроводите рисунком и подробным обоснованием.

- * 4. Стрела, выпущенная из лука вертикально вверх, упала на поверхность земли через 6 с после начала движения. Чему равно перемещение стрель? Какова наибольшая высота подъема стрель? Каков пройденный путь?
- * 5. Тело движется равноускоренно без начальной скорости. Во сколько раз перемещение тела за восьмую секунду движения больше перемещения за третью секунду?

§ 20. СИЛА УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА

В курсе 7 класса вы ознакомились с механическими свойствами твердых тел: упругостью, пластичностью, прочностью, хрупкостью, твердостью. Механические свойства твердого тела определяются силами взаимодействия между частицами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Частицы (атомы, молекулы, ионы) твердых тел находятся на расстояниях, оцениваемых диаметром самой частицы ($R \approx d_0$), при котором равнодействующая сил притяжения и отталкивания равна нулю. Как вы знаете, силы взаимного притяжения и отталкивания действуют одновременно. При сближении частиц начинают преобладать силы отталкивания, а при их удалении — силы притяжения. Это и обуславливает способность твердых тел противодействовать изменению их формы и размеров. Изменение формы и размеров тела под действием внешней силы называется деформацией.

Твердые тела испытывают различные виды деформаций: растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение. При деформации тел изменяется соотношение сил взаимодействия между частицами. Так, при деформации растяжения большие силы притяжения между частицами препятствуют растяжению тел, при деформации сжатия большие силы отталкивания препятствуют сжатию. Сила, возникающая при деформации тела и направленная в сторону, противоположную смещению частиц, называется силой упругости. Эта сила — сумма межмолекулярных или межатомных сил, возникающих при деформации тела. Поскольку тела состоят из молекул, молекулы — из атомов и между атомами в молекуле проявляются силы электромагнитного взаимодействия, то и сила упругости — сила электромагнитного взаимодействия или сила электромагнитной природы. Сила упругости обозначается так: $F_{упр}$, единица в СИ [$F_{упр}$] = Н. Сила упругости возникает в деформированном теле.

Деформации, которые полностью исчезают после прекращения действия внешней силы, называют упругими. При упругих деформациях сила упругости связана с величиной деформации тела. Чтобы убедиться в этом и установить функциональную зависимость связи силы упругости и величины деформации тела, проведите исследование.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЛИНЕНИЯ РЕЗИНЫ ОТ СИЛЫ УПРУГОСТИ

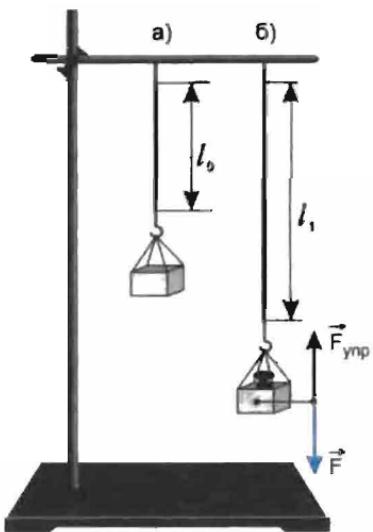


Рис. 159. Схема установки для исследования зависимости удлинения резинового жгута от силы упругости

тяжести, действующая на гири; $\vec{F}_{\text{упр}}$ – сила упругости, возникающая в жгуте, но действующая на гири.

4. Для каждого случая рассчитайте удлинение жгута:

$$\Delta l_1 = l_1 - l_0, \quad \Delta l_2 = l_2 - l_0, \quad \Delta l_3 = l_3 - l_0, \quad \Delta l_4 = l_4 - l_0.$$

5. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| № опыта | $l_0, \text{ м}$ | $l, \text{ м}$ | $\Delta l, \text{ м}$ | $m, 10^{-3} \text{ кг}$ | $F, 10^{-2} \text{ Н}$ | $F_{\text{упр}}, 10^{-2} \text{ Н}$ |
|---------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 1 | | | | 0 | | |
| 2 | | | | 2 | | |
| 3 | | | | 4 | | |
| 4 | | | | 6 | | |
| 5 | | | | 8 | | |

6. По полученным экспериментальным данным постройте график зависимости силы упругости от удлинения резинового жгута в системе координат $F = F(\Delta l)$.

Можно использовать резиновую ленту и грузы из набора по механике.

7. На основе анализа графика сделайте вывод о зависимости удлинения резинового жгута от силы упругости.

Если снять всю нагрузку с резинового жгута (все гири), то он примет первоначальную длину: расстояние между отметками останется прежним. (Убедитесь в этом!) Следовательно, деформацию резинового жгута можно считать упругой.

По результатам исследования получили, что $\Delta l \sim F_{\text{упр}}$. Эту функциональную зависимость можно представить в следующем виде: $F_{\text{упр}} = k\Delta l$, где k – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом упругости деформируемого тела* (или *жесткостью*).

Учитывая то, что *сила упругости всегда направлена противоположно деформации*, запишем равенство в векторной форме:



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

Сила упругости прямо пропорциональна деформации тела.

В 1660 г. английский ученый Роберт Гук обнаружил такую зависимость при растяжении стержня. В честь его эта зависимость получила название *закона Гука*.

Из закона Гука выразим коэффициент упругости (жесткость): $k = |\vec{F}_{\text{упр}}| / |\Delta l|$. Единица в СИ $[k] = \text{Н/м}$.

От чего зависит коэффициент упругости? Чтобы это выяснить, вспомним математическую запись закона Гука, который мы изучали в курсе 7 класса: $\sigma = E|\epsilon|$. Но механическое напряжение $\sigma = F/S$, а относительное удлинение $\epsilon = \Delta l/l_0$. Подставив эти выражения в закон Гука, получаем

$$F/S = E \cdot \Delta l/l_0 \Rightarrow F = \frac{ES}{l_0} \Delta l.$$

Так как при малых деформациях модуль Юнга $E = \text{const}$, $l_0 = \text{const}$, площадь поперечного сечения образца $S = \text{const}$, то

$$\frac{ES}{l_0} = \text{const} = k.$$

Иначе

$$F = k\Delta l.$$

Сравнив последнее уравнение с математической записью закона Гука, можно сделать вывод: *коэффициент упругости k зависит от упругих свойств материала (модуля Юнга E), первоначальной длины (l_0), площади поперечного сечения образца (S)*.

Закон Гука справедлив для большинства твердых тел при малых упругих деформациях.

Пример решения задачи

На рисунке 160 изображен график зависимости силы упругости, возникающей в буксирном тросе, от удлинения троса. Чему равен коэффициент упругости троса?

$$k = ?$$

$$\begin{aligned}l_0 &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\l &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\F_{\text{упр}} &= 150 \text{ Н}\end{aligned}$$

Решение

По закону Гука $\vec{F}_{\text{упр}} = -k\Delta l$.

Отсюда $k = |\vec{F}_{\text{упр}}| / \Delta l$.

Так как $\Delta l = l - l_0$, то $k = F_{\text{упр}} / (l - l_0)$;

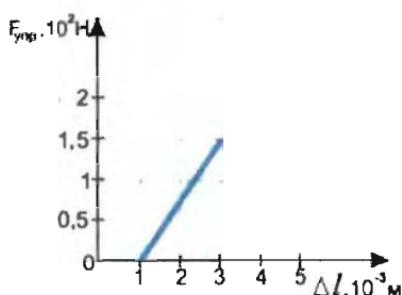


Рис. 160

примеры. 4) Что понимают под силой упругости? Какова причина ее возникновения? Какой природы эта сила? К чему приложена и как направлена сила упругости? 5) В каком известном вам измерительному приборе используется прямо пропорциональная зависимость $F = F(\Delta l)$?

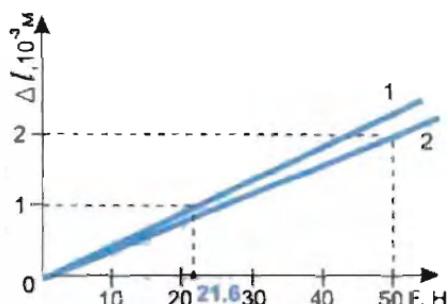


Рис. 161

1. Расскажите о законе Гука по следующему плану:

- Связь между какими величинами выражает закон?
- Как формулируется закон?
- Запишите его математическое выражение.
- Изобразите график зависимости $F = F(\Delta l)$.
- Каковы условия применимости этого закона?

2. По результатам исследования (лабораторная работа 3) рассчитайте значение коэффициента упругости резинового жгута.

3. На рисунке 161 приведены графики зависимости удлинения образца от приложенной силы для проволок равной длины и площади поперечного сечения, изготовленных из никеля (1) и хрома (2). Определите коэффициент упругости каждой проволоки. Сравните значения коэффициентов упругости.

1. При буксировке автомобиля ватрос действует сила, равная 1000 Н. Рассчитайте удлинение троса при буксировке автомобиля. Коэффициент упругости примите равным 10^8 Н/м.

2. Под действием некоторой силы пружина с коэффициентом упругости 1500 Н/м удлинилась на 5 см. Чему равна сила упругости, возникающая в пружине? Какая сила деформировала пружину? Чему она равна?

3. График отражает зависимость модуля силы упругости пружины от ее деформации (рис. 162). Каков коэффициент упругости пружины?

4. К пружине с коэффициентом упругости 180 Н/м подвесили груз, который растянул ее на 3 см. Чему равна сила упругости, возникающая в пружине? Какова масса груза? Постройте график зависимости силы упругости от удлинения для этой пружины $F = F(\Delta l)$.

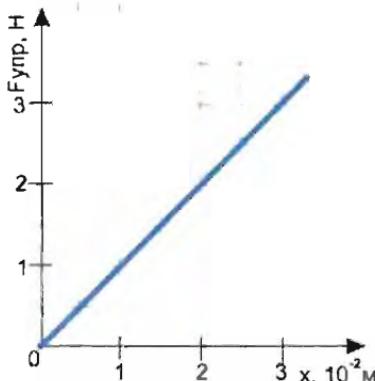


Рис. 162

21. ВЕС ТЕЛА. НЕВЕСОМОСТЬ

Мы часто употребляем слово «вес», но в самых разных смыслах. Когда мы говорим, что Останкинская телевизионная башня в Москве своим весом давит на фундамент, то имеем в виду силу, с которой башня давит на опору. В этом случае мы связываем вес с действием на опору (фундамент). Когда мы говорим: у грузовика большой вес, то имеем в виду, что он тяжело нагружен, что на него и груз действует большая сила притяжения (сила тяжести) со стороны Земли. В этом случае мы связываем вес с самим телом, рассматриваем его как свойство самого тела. Совсем иной смысл мы придаём слову «вес», когда покупаем продукты в магазине и просим их взвесить. Что же такое вес тела? Какой природы эта сила? Где возникает и к чему приложен вес тела? Постараемся дать ответы на поставленные вопросы.

Силу, с которой тело в результате действия силы тяжести давит на опору или растягивает подвес, называют весом тела.

Вес тела, находящегося на неподвижной опоре. Рассмотрим тело массой m . Находящееся на горизонтальной опоре (рис. 163, а).

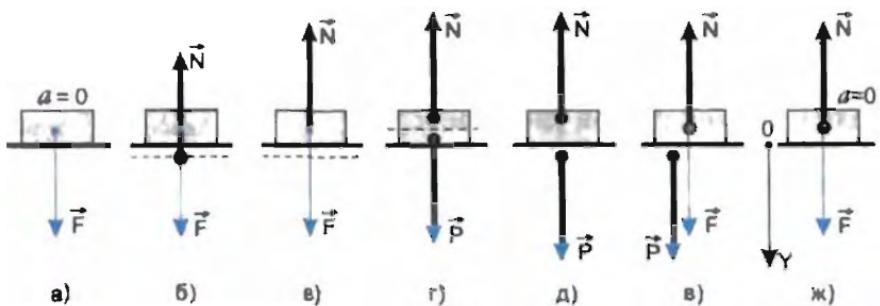


Рис. 163

На тело со стороны Земли действует сила тяжести \vec{F} . Сила тяжести – сила гравитационной природы, приложена к центру тяжести тела и направлена к центру Земли. В результате действия силы тяжести опора деформируется (сжимается) и частицы опоры (молекулы, атомы) приближаются друг к другу (на рисунке 163, б, в штриховой линией показана деформация опоры). Между частицами опоры возникают большие силы отталкивания. Сумма больших межмолекулярных или межатомных сил, возникающих при деформации опоры, – это сила упругости. Силу упругости, возникающую в опоре, обозначим буквой латинского алфавита \vec{N} (читается «эн») и будем называть силой реакции опоры. Сила реакции опоры – сила электромагнитной природы; она возникает в опоре, но действует на тело. Так как опора и тело неподвижны, то модуль силы реакции опоры равен модулю силы тяжести: $|\vec{N}| = |\vec{F}|$ (см. рис. 163, б, в).

Под действием силы реакции опоры тело деформируется (сжимается) и в деформированном теле частицы приближаются друг к другу (на рисунке 163, г деформация тела показана штриховой линией). В результате между частицами тела возникают большие силы отталкивания. Сумма больших межмолекулярных или межатомных сил отталкивания, возникающих при деформации тела, – это сила упругости. Сила упругости возникает в деформированном теле, но действует на опору. Сила упругости, возникающая в деформированном теле, но действующая на опору, – это вес тела. Вес тела обозначим буквой латинского алфавита \vec{P} (читается «пэ»; рис. 163, г, д). Вес тела – сила электромагнитной природы. Изобразим все силы, которые в этом случае действуют на тело и опору (рис. 163, е).

Чему равен вес тела? Воспользуемся вторым законом Ньютона: $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, где $\sum \vec{F}$ – равнодействующая всех сил, действующих на тело; \vec{a} – ускорение тела. Так как на тело действуют сила тяжести \vec{F} и сила реакции опоры \vec{N} (рис. 163, ж) и $a = 0$ (тело поконится), то второй закон Ньютона запишем в виде

$$\vec{F} + \vec{N} = 0.$$

Введем инерциальную систему отсчета (ИСО): точку отсчета свяжем с опорой, а положительное направление координатной оси OY укажем по направлению действия силы тяжести. Запишем второй закон Ньютона в проекции на координатную ось OY :

$$F - N = 0 \Rightarrow F = N.$$

Но по третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$, значит, $F = P \Rightarrow$

$$P = F.$$

Если тело покоятся или движется равномерно и прямолинейно вверх (вниз), то вес тела численно равен силе тяжести.

Вес тела, подвешенного к подвесу. Вернемся еще раз к определению веса тела: «Сила, с которой тело, в результате действия силы тяжести ... растягивает подвес». Подвесом может быть нить, веревка, трос, пружина и т. д. Прикрепим тело (цилиндр) к одному концу нити, другой конец нити закрепим в лапке штатива (рис. 164, а). Система неподвижна, поэтому $a = 0$. Какие силы в этом случае действуют?

На цилиндр действует сила тяжести \vec{F} , приложенная к его центру тяжести, но направленная вниз – к центру Земли. Под действием силы тяжести цилиндр начинает падать, увлекая за собой нижний конец нити, нить деформируется (растягивается). Расстояние между частицами увеличивается, возникают большие силы притяжения. Сумма больших межмолекулярных или межатомных сил притяжения, возникающих при растяжении нити, – сила упругости, направленная против деформации, т. е. вверх. Сила упругости нити (будем ее называть силой натяжения) – сила электромагнитной природы; обозначается буквой латинского алфавита \vec{T} (читается «тэ») (рис. 164, б).

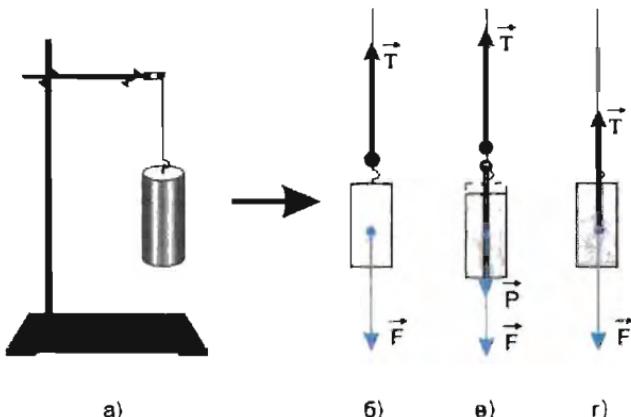


Рис. 164

Верхний край цилиндра будет «отставать» в своем падении от других частей тела, к которым сила натяжения \vec{T} не приложена. Вследствие этого цилиндр деформируется (растягивается). Расстояние между частицами цилиндра увеличивается, возникают большие силы притяжения. Сумма больших межмолекулярных или межатомных сил притяжения, возникающих при растяжении, — *сила упругости деформированного тела* (цилиндра). Она возникает в цилиндре, но действует на нить и направлена вниз — это вес тела \vec{P} (рис. 164, *в*).

По третьему закону Ньютона вес тела численно равен силе натяжения нити $|\vec{P}| = |\vec{T}|$; эти силы одной природы, но приложены к разным телам. Вес тела \vec{P} возникает в цилиндре, но действует на нить; сила натяжения \vec{T} возникает в нити, но действует на тело. В дальнейшем будем указывать только силы, действующие на тело. В нашем примере цилиндр поконится, поэтому $|\vec{F}| = |\vec{T}|$ (рис. 164, *в*).

Но по третьему закону Ньютона $|\vec{T}| = |\vec{P}|$, значит, $F = P \Rightarrow$

$$P = F.$$

Если тело, подвешенное к подвесу, поконится или движется равномерно и прямолинейно вверх (вниз), то вес тела численно равен силе тяжести.

Вес тела, движущегося вверх вместе с опорой. Рассмотрим тело массой m , находящееся на горизонтальной опоре. Заставим тело вместе с опорой подниматься вверх с ускорением, меньшим ускорения свободного падения: $\vec{a} < \vec{g}$ (рис. 165, *а*). Подобная си-

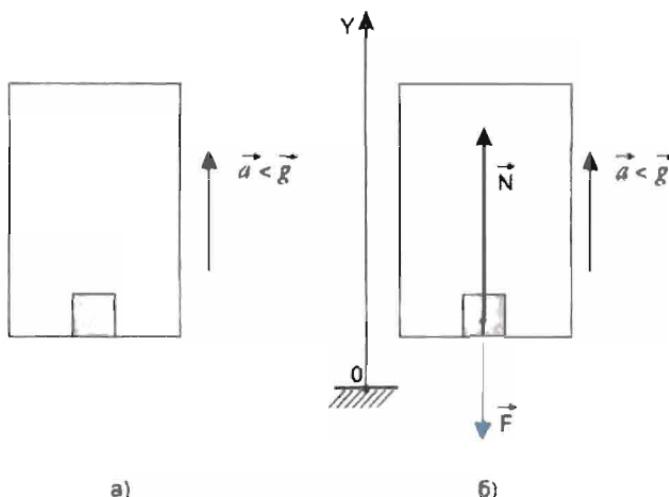


Рис. 165

туация возникает, когда вы находитесь в кабине лифта и лифт поднимается вверх.

Введем инерциальную систему отсчета (ИСО): точку отсчета связем с неподвижной Землей, а положительное направление координатной оси OY укажем вверх – по направлению движения тела вместе с опорой. Укажем силы, действующие на тело (рис. 165, б), и запишем второй закон Ньютона:

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

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$-F + N = ma \Rightarrow N = F + ma.$$

Так как по третьему закону Ньютона $|N| = |\vec{P}|$, то

$$P = F + ma, \quad \text{или} \quad P > F.$$

Если тело вместе с опорой движется вверх ($\vec{a} < \vec{g}$), то вес тела больше силы тяжести.

* **Перегрузки и их влияние на организм человека.** Состояние, при котором за счет ускоренного движения опоры (подвеса), вес тела больше силы тяжести, называется перегрузкой.

Преобразуем уравнение для расчета веса тела при $\vec{a} > \vec{g}$:

$$P = F + ma \Rightarrow P = mg + ma \Rightarrow P = m(g + a) \Rightarrow P = mg(1 + a/g).$$

Отношение a/g в последнем выражении обозначим буквой латинского алфавита n (читается «эн»); n – коэффициент перегрузки.

При n -кратной перегрузке вес тела будет определяться по формуле

$$P = mg(1 + n).$$

Каковы воздействия перегрузок на организм человека? Они зависят от коэффициента перегрузки, продолжительности перегрузки, состояния организма, направления воздействия и других факторов.

При перегрузке не только все тело начинает давить сильнее на опору, но и отдельные органы, кости начинают сильнее оказывать воздействие друг на друга. У человека затрудняется дыхание, ухудшается сердечная деятельность, происходит перераспределение крови (ее прилив или отлив от головы), возникают болевые ощущения.

Верхний край цилиндра будет «отставать» в своем падении от других частей тела, к которым сила натяжения \vec{T} не приложена. Вследствие этого цилиндр деформируется (растягивается). Расстояние между частицами цилиндра увеличивается, возникают большие силы притяжения. Сумма больших межмолекулярных или межатомных сил притяжения, возникающих при растяжении, — сила упругости деформированного тела (цилиндра). Она возникает в цилиндре, но действует на нить и направлена вниз — это вес тела \vec{P} (рис. 164, в).

По третьему закону Ньютона вес тела численно равен силе натяжения нити $|\vec{P}| = |\vec{T}|$: эти силы одной природы, но приложены к разным телам. Вес тела \vec{P} возникает в цилиндре, но действует на нить; сила натяжения \vec{T} возникает в нити, но действует на тело. В дальнейшем будем указывать только силы, действующие на тело. В нашем примере цилиндр поконится, поэтому $|\vec{F}| = |\vec{T}|$ (рис. 164, г).

Но по третьему закону Ньютона $|\vec{T}| = |\vec{P}|$, значит, $F = P \Rightarrow$

$$P = F.$$

Если тело, подвешенное к подвесу, поконится или движется равномерно и прямолинейно вверх (вниз), то вес тела численно равен силе тяжести.

Вес тела, движущегося вверх вместе с опорой. Рассмотрим тело массой m , находящееся на горизонтальной опоре. Заставим тело вместе с опорой подниматься вверх с ускорением, меньшим ускорения свободного падения: $\vec{a} < \vec{g}$ (рис. 165, а). Подобная си-

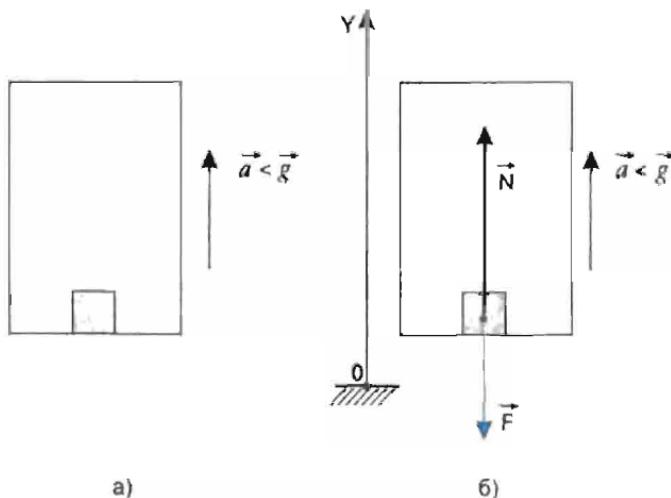


Рис. 165

туация возникает, когда вы находитесь в кабине лифта и лифт поднимается вверх.

Введем инерциальную систему отсчета (ИСО): точку отсчета свяжем с неподвижной Землей, а положительное направление координатной оси OY укажем вверх – по направлению движения тела вместе с опорой. Укажем силы, действующие на тело (рис. 1.65, б), и запишем второй закон Ньютона:

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

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$-F + N = ma \Rightarrow N = F + ma.$$

Так как по третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$, то

$$P = F + ma, \quad \text{или} \quad P > F.$$

Если тело вместе с опорой движется вверх ($\vec{a} < \vec{g}$), то вес тела больше силы тяжести.

* **Перегрузки и их влияние на организм человека.** Состояние, при котором за счет ускоренного движения опоры (подвеса), вес тела больше силы тяжести, называется перегрузкой.

Преобразуем уравнение для расчета веса тела при $\vec{a} > \vec{g}$:

$$P = F + ma \Rightarrow P = mg + ma \Rightarrow P = m(g + a) \Rightarrow P = mg(1 + a/g).$$

Отношение a/g в последнем выражении обозначим буквой латинского алфавита n (читается «эн»); n – коэффициент перегрузки.

При n -кратной перегрузке вес тела будет определяться по формуле

$$P = mg(1 + n).$$

Каковы воздействия перегрузок на организм человека? Они зависят от коэффициента перегрузки, продолжительности перегрузки, состояния организма, направления воздействия и других факторов.

При перегрузке не только все тело начинает давить сильнее на опору, но и отдельные органы, кости начинают сильнее оказывать воздействие друг на друга. У человека затрудняется дыхание, ухудшается сердечная деятельность, происходит перераспределение крови (ее прилив или отлив от головы), возникают болевые ощущения.

Небольшие перегрузки испытываете и вы, когда находитесь в лифте, который поднимается вверх при нажатии кнопки «пуск» или останавливается. Когда на человека действует 2-кратная перегрузка в направлении от головы к ногам, то ощущается давление всего тела на опору, напряжение мышц, но самочувствие не ухудшается. При 3–4-кратной перегрузке требуются большие усилия для удержания головы в вертикальном положении, ощущаются затруднения в дыхании, возникают болезненные ощущения из-за смещения внутренних органов, нарушается координация движений, меняется внешний облик из-за смещения подвижных участков кожи на лице. При 4–5-кратной перегрузке, кроме этого, могут возникать зрительные нарушения (серая пелена), при большей перегрузке возможна потеря зрения (черная пелена). Легче переносятся перегрузки, направленные от спины к груди, от груди к спине и от одного бока к другому.

В авиации выполняются фигуры высшего пилотажа: петля Нестерова, вираж, штопор и др. Петля Нестерова, или «мертвая петля», — замкнутая кривая в вертикальной плоскости. Впервые такую петлю выполнил русский летчик *П.Н. Нестеров* в 1913 г. В нижней части «мертвой петли» легчик испытывает 2–8-кратную перегрузку, при выполнении виража — 3–5-кратную перегрузку, а при выполнении штопора 2–3-кратную перегрузку. При катапультировании из самолета пилот в течение 0,1 с испытывает 16-кратную перегрузку, в момент раскрытия парашюта при скорости 25 м/с — 1,3-кратную перегрузку, а при скорости 50 м/с — 5,2-кратную перегрузку.

4 октября 1957 г. началась космическая эра — был запущен первый искусственный спутник Земли (ИСЗ), а уже через месяц — второй спутник с собакой Лайкой на борту. 12 апреля 1961 г. на околоземную орбиту был выведен космический корабль «Восток», на котором находился первый космонавт *Ю.А. Гагарин*. Вот как он описывал свой старт в космос: «Я почувствовал, какая-то непреоборимая сила все больше и больше вдавливает меня в кресло. И хотя оно было расположено так, чтобы до предела сократить влияние огромной тяжести, наваливающейся на мое тело, было трудно пошевелить рукой и ногой...»



Гагарин Юрий Алексеевич (1934–1968) — первый человек, совершивший полет в космос. 12 апреля 1961 г. на космическом корабле «Восток» облетел Землю за 1 ч 48 мин. Участвовал в обучении и тренировке экипажей космонавтов. Его именем назван кратер на обратной стороне Луны, Центр подготовки космонавтов.

В настоящее время систематически осуществляется запуск космических кораблей. При старте космического корабля возникает перегрузка; на участке разгона ракеты-носителя космического аппарата $n = 7,7 - 7,8$. Установлено, что если время действия перегрузки составляет менее 0,1 с, то человек способен переносить 20-кратную перегрузку. Космонавты достаточно хорошо переносят 8-кратную перегрузку в течение 3 с, 5-кратную в течение 12–15 с. Переносить значительные перегрузки могут только хорошо тренированные люди. Поэтому перед полетом космонавты проводят тренировки в специальных ускорителях, центрифугах и на других установках. Применяются специальные противоперегрузочные костюмы, конструкция которых обеспечивает фиксацию внутренних органов.

Только ли человек испытывает перегрузки? Имеют свои пределы на перегрузку и машины, механизмы, приборы. Поэтому все приборы и узлы космических аппаратов, самолетов подвергают испытаниям на многократную перегрузку.

На Земле многократную перегрузку испытывают и другие живые организмы. Так, когда дятел ищет насекомых или готовит дупло под гнездо, то он клювом долбит дерево, и перегрузка в конце удара достигает 1000. Однако мозг птицы никогда не травмируется. Ускоренная киносъемка показала, что голова дятла перемещается только вперед и назад в одной плоскости, без боковых смещений. Этот факт позволил инженерам улучшить защитные шлемы космонавтов: специальные шейные скобы ограничивают боковые смещения головы.

Вес тела, движущегося вниз вместе с опорой. Заставим тело массой m опускаться вместе с опорой вниз с ускорением $\bar{a} < \bar{g}$ (рис. 166, а). Подобная ситуация возникает, когда вы находитесь в кабине лифта на верхнем этаже и лифт начинает опускаться.

Введем ИСО: точку отсчета свяжем с неподвижной землей (с крышей здания), а положительное направление координатной оси OY укажем вниз – по направлению движения тела вместе с опорой. Укажем силы, действующие на тело (рис. 166, б), и запишем второй закон Ньютона:

$$\begin{aligned}\sum \vec{F} &= m\bar{a}, \\ \vec{F} + \vec{N} &= m\bar{a}.\end{aligned}$$

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$F - N = ma \Rightarrow F - ma = N \Rightarrow N = F - ma.$$

Так как по третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$, то

$$P = F - ma, \quad \text{или} \quad P < F.$$

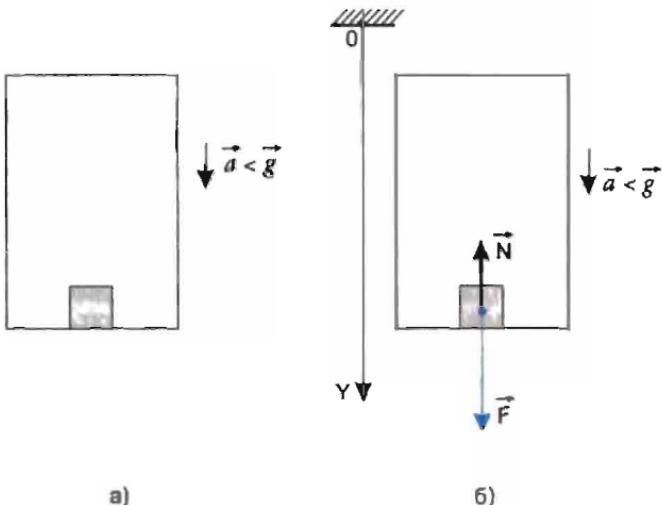


Рис. 166

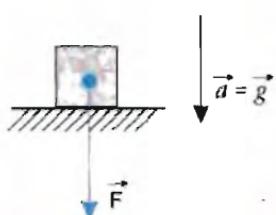
Если тело вместе с опорой движется вниз ($\vec{a} < \vec{g}$), то вес тела меньше силы тяжести.

Невесомость. Чему будет равен вес тела массой m , если оно вместе с опорой будет свободно падать? В этом случае на тело и опору будет действовать только сила всемирного тяготения (сила тяжести). Под действием силы тяжести каждая частица тела и опоры будет двигаться с одним и тем же по модулю и направлению ускорением, равным ускорению свободного падения ($a = g$) (рис. 167). Ни в опоре, ни в теле не возникают силы упругости, а значит, *вес равен нулю*.

Покажем это математически, используя полученное ранее уравнение:

$$P = F - ma \Rightarrow P = mg - ma \Rightarrow P = mg - mg = 0 \Rightarrow P = 0 - \text{вес равен нулю.}$$

Состояние, при котором в телах, свободно движущихся в гравитационном поле, исчезают деформации и взаимные давления частиц тела друг на друга, называется невесомостью.



• В состоянии невесомости масса тела не меняется, на тело действует только сила тяжести. Под действием силы тяжести тело свободно падает.

• **Влияние невесомости на организм человека.** Невесомость достаточно распространённое состояние. В таком состоянии вы

Рис. 167

находитесь, когда прыгаете (с момента отрыва от земли и до момента приземления), бегаете (в короткие промежутки времени между касаниями ногой земли). Состояние невесомости испытывают прыгуны с вышки (с момента толчка от трамплина до момента касания воды), парашютисты в первый момент своего падения (когда парашют не раскрыт и сопротивлением воздуха можно пренебречь).

Состояние невесомости моделируют в специальных самолетах-лабораториях. Для этого самолет переводят в режим набора высоты по параболической траектории с $a = g$; при этом сила тяги двигателей компенсирует силу сопротивления воздуха. Пока самолет будет двигаться по восходящей, а затем по нисходящей части параболы, внутри могут наблюдаться необыкновенные явления: зависают все незакрепленные предметы, маятник замирает в отклоненном состоянии, выплеснутая из стакана вода большой шарообразной каплей повисает в воздухе.

На Земле состояние невесомости наблюдают в башнях невесомости (высоких сооружениях, внутри которых свободно падают контейнеры с исследовательской аппаратурой — приборами и агрегатами ИСЗ, космических кораблей, ракет-носителей), в ракетах-зондах, поднимающихся в разреженные слои атмосферы, после чего их двигатели отключают и они переходят в режим свободного падения.

В Центре подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина проводятся специальные тренировки в бассейне, в котором имитируется состояние невесомости. В бассейне вес тела уравновешивается архимедовой силой, тело становится невесомым и свободно перемещается в любом направлении. Гидроневесомость отличается от настоящей невесомости прежде всего наличием сопротивления водной среды.

Состояние невесомости, моделируемое на Земле, длится короткое время: несколько секунд в башнях невесомости, около 2 мин при полете самолета-лаборатории, несколько десятков минут в ракетах-зонах. Длительное время состояние невесомости наблюдается в космическом корабле или ИСЗ, поскольку его движение по орбите вокруг Земли представляет собой непрерывное свободное падение.

На Земле в обычных условиях человек привык к наличию деформаций в его теле и не замечает их. Опорно-двигательный аппарат (скелет с суставами, связками и мышцами, прикрепленными к костям) должен быть прочным для удержания тела человека в вертикальном положении. В состоянии невесомости изменяется ряд функций: обмен веществ, кровообращение и др. В невесомости мышцы человека не испытывают весовой нагрузки: он не ходит, а плавает, опорно-двигательный аппарат становится ненужным. Для перемещения большие преимущества приобретают руки, а не ноги. Во время длительных космических полетов у космонавтов мышцы начинают частично атрофироваться; из кос-

тей организма вымываются соли кальция, которые определяют их прочность; меняется координация движений. Поэтому, находясь в космическом корабле, космонавты занимаются на специальных тренажерах, нагружающих различные группы мышц. В пищу космонавтов вводят комплекс витаминов и минералов, а также продукты, богатые солями кальция.

В состоянии невесомости происходит дезориентация в пространстве (исчезает различие между полом и потолком), связанная с нарушением деятельности вестибулярного аппарата, зрения, кожной и мышечной чувствительности. В состоянии невесомости кровь становится невесомой, в результате происходит перераспределение циркулирующей крови (из нижней части тела она устремляется в верхнюю). Возрастающий поток крови к сердцу воспринимается нервными окончаниями как «аварийная ситуация». Запускаются механизмы циркуляции, они приводят к уменьшению объема циркулирующей крови; почки выделяют повышенное количество воды. Одновременно уменьшается чувство жажды, нарушается водный баланс в организме — организм обезвоживается. Такие же явления будут наблюдаться и при движении в поле тяготения других небесных тел (планет, спутников планет и др.).

Создание благоприятных условий жизни и работы человека в состоянии невесомости — одна из проблем космонавтики. Поэтому при длительных полетах человека на околоземных или межпланетных станциях предполагается создавать искусственную тяжесть. Можно располагать рабочие помещения в кабинах, вращающихся вокруг центральной части станции. Благодаря вращению тела в кабине будут прижиматься к ее боковой поверхности, которая будет играть роль пола, а реакция пола, приложенная к телам — создавать искусственную тяжесть.

Примеры решения задач

Задача 1. Мальчик массой 50 кг входит в пассажирский лифт на верхнем этаже и нажимает на кнопку «пуск». Среднее ускорение лифта при опускании $0,4 \text{ м/с}^2$. Чему будет равен вес мальчика при опускании лифта? На сколько различаются вес мальчика и сила тяжести, действующая на него?

$$P = ? \quad P \vee F$$

$$\begin{aligned} m &= 50 \text{ кг} \\ a &= 0,4 \text{ м/с}^2 \\ g &\approx 10 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

Решение

Введем ИСО: точку отсчета свяжем с крышей дома, положительное направление координатной оси OY укажем по направлению движения лифта с мальчиком (рис. 168).

Укажем силы, действующие на тело (см. рис. 168), и запишем второй закон Ньютона:

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m\vec{a}, \\ \vec{F} + \vec{N} &= m\vec{a}. \end{aligned}$$

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$F - N = ma \Rightarrow F - ma = N \Rightarrow N = F - ma.$$

Так как по третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$, то $P = F - ma \Rightarrow P = mg - ma \Rightarrow P = m(g - a)$.

$$F = mg.$$

$$[P] = \text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с}^2 - \text{м}/\text{с}^2) = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = \text{Н}.$$

$$P = 50(10 - 0,4) = 50 \cdot 9,6 = 480 \text{ (Н)}.$$

$$F = 50 \cdot 10 = 500 \text{ (Н)}.$$

$$P < F \text{ на } 20 \text{ Н.}$$

Ответ: вес мальчика в опускающемся лифте равен 480 Н; вес мальчика меньше силы тяжести, действующей на него со стороны поля тяготения Земли, на 20 Н.

Задача 2. С помощью подъемного крана поднимают бетонную плиту массой 300 кг. Чему равна сила натяжения троса в начале подъема, если плита начала двигаться с ускорением 6 $\text{м}/\text{с}^2$? Чему равен вес плиты? Сравните вес плиты и силу тяжести, действующую на плиту.

$$T - ? \quad P - ? \quad P \vee F$$

$$m = 300 \text{ кг}$$

$$a = 6 \text{ м}/\text{с}^2$$

$$g \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$$

Решение

Выполним схематический рисунок (рис. 169); введем ИСО: точку отсчета свяжем с неподвижной Землей, положительное направление координатной оси OY укажем по направлению движения бетонной плиты.

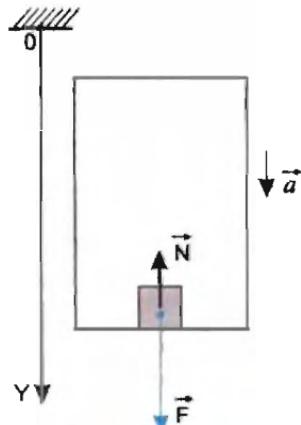


Рис. 168

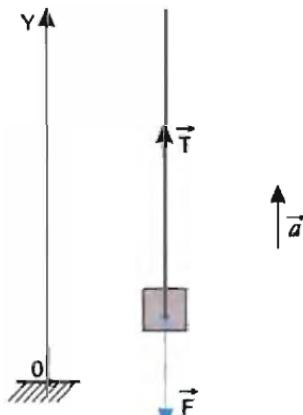


Рис. 169

тей организма вымываются соли кальция, которые определяют их прочность; меняется координация движений. Поэтому, находясь в космическом корабле, космонавты занимаются на специальных тренажерах, нагружающих различные группы мышц. В пищу космонавтов вводят комплекс витаминов и минералов, а также продукты, богатые солями кальция.

В состоянии невесомости происходит дезориентация в пространстве (исчезает различие между полом и потолком), связанная с нарушением деятельности вестибулярного аппарата, зрения, кожной и мышечной чувствительности. В состоянии невесомости кровь становится невесомой, в результате происходит перераспределение циркулирующей крови (из нижней части тела она устремляется в верхнюю). Возрастающий поток крови к сердцу воспринимается нервными окончаниями как «аварийная ситуация». Запускаются механизмы циркуляции, они приводят к уменьшению объема циркулирующей крови; почки выделяют повышенное количество воды. Одновременно уменьшается чувство жажды, нарушается водный баланс в организме — организм обезвоживается. Такие же явления будут наблюдаться и при движении в поле тяготения других небесных тел (планет, спутников планет и др.).

Создание благоприятных условий жизни и работы человека в состоянии невесомости — одна из проблем космонавтики. Поэтому при длительных полетах человека на околоземных или межпланетных станциях предполагается создавать искусственную тяжесть. Можно располагать рабочие помещения в кабинах, врашающихся вокруг центральной части станции. Благодаря вращению тела в кабине будут прижиматься к ее боковой поверхности, которая будет играть роль пола, а реакция пола, приложенная к телам — создавать искусственную тяжесть.

Примеры решения задач

Задача 1. Мальчик массой 50 кг входит в пассажирский лифт на верхнем этаже и нажимает на кнопку «пуск». Среднее ускорение лифта при опускании $0,4 \text{ м/с}^2$. Чему будет равен вес мальчика при опускании лифта? На сколько различаются вес мальчика и сила тяжести, действующая на него?

$$P = ? \quad P \vee F$$

$$\begin{aligned} m &= 50 \text{ кг} \\ a &= 0,4 \text{ м/с}^2 \\ g &\approx 10 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

Решение

Введем ИСО: точку отсчета связем с крышей дома, положительное направление координатной оси OY укажем по направлению движения лифта с мальчиком (рис. 168).

Укажем силы, действующие на тело (см. рис. 168), и запишем второй закон Ньютона:

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m\vec{a}, \\ \vec{F} + \vec{N} &= m\vec{a}. \end{aligned}$$

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$F - N = ma \Rightarrow F - ma = N \Rightarrow N = F - ma.$$

Так как по третьему закону Ньютона $|N| = |\bar{P}|$, то $P = F - ma \Rightarrow P = mg - ma \Rightarrow P = m(g - a)$.

$$F = mg.$$

$$[P] = \text{кг} (\text{м}/\text{с}^2 - \text{м}/\text{с}^2) = \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2 = \text{Н}.$$

$$P = 50(10 - 0,4) = 50 \cdot 9,6 = 480 \text{ (Н)}.$$

$$F = 50 \cdot 10 = 500 \text{ (Н)}.$$

$$P < F \text{ на } 20 \text{ Н.}$$

Ответ: вес мальчика в опускающемся лифте равен 480 Н; вес мальчика меньше силы тяжести, действующей на него со стороны поля тяготения Земли, на 20 Н.

Задача 2. С помощью подъемного крана поднимают бетонную плиту массой 300 кг. Чему равна сила натяжения троса в начале подъема, если плиты начала двигаться с ускорением $6 \text{ м}/\text{с}^2$? Чему равен вес плиты? Сравните вес плиты и силу тяжести, действующую на плиту.

$$T = ? \quad P = ? \quad P \vee F$$

$$m = 300 \text{ кг}$$

$$a = 6 \text{ м}/\text{с}^2$$

$$g \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$$

Решение

Выполним схематический рисунок (рис. 169); введем ИСО: точку отсчета свяжем с неподвижной Землей, положительное направление координатной оси OY укажем по направлению движения бетонной плиты.

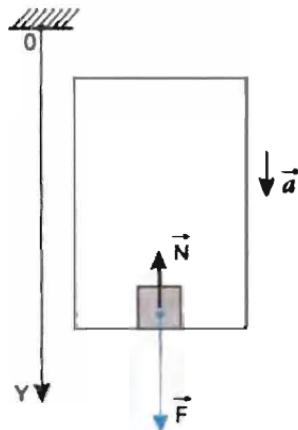


Рис. 168

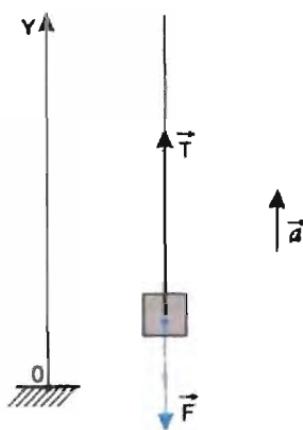


Рис. 169

Укажем силы, действующие на тело, и запишем второй закон Ньютона:

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

$$\vec{F} + \vec{T} = m\vec{a}.$$

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$- F + T = ma \Rightarrow T = F + ma \Rightarrow T = mg + ma \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T = m(g + a).$$

$$[T] = \text{кг}(\text{м/с}^2 + \text{м/с}^2) = \text{кг} \cdot \text{м/с}^2 = \text{Н.}$$

$$T = 300(10 + 6) = 300 \cdot 16 = 4800 \text{ (Н).}$$

По третьему закону Ньютона $|\vec{P}| = |\vec{T}|$, значит, вес бетонной плиты равен 4800 Н.

Сила тяжести, действующая на плиту, рассчитывается по формуле

$$F = mg.$$

$$F = 300 \cdot 10 = 3000 \text{ (Н).}$$

Сравнивая вес и силу тяжести, получаем, что вес бетонной плиты больше силы тяжести, действующей на плиту, на 1800 Н (или вес бетонной плиты больше силы тяжести, действующей на плиту, в 1,6 раза).

Ответ: сила натяжения троса равна 4800 Н, вес бетонной плиты равен 4800 Н, вес плиты больше силы тяжести на 1800 Н.

Задача 3. При выполнении фигуры высшего пилотажа – петли Нестегрова – летчик давит на сиденье кресла в нижней точке траектории с силой 7200 Н. Чему равна скорость самолета в этой точке? Масса летчика 80 кг, радиус петли 250 м. Выразите скорость самолета: м/с и км/ч.

$$v = ?$$

$$F_d = P = 7200 \text{ Н}$$

$$m = 80 \text{ кг}$$

$$R = 250 \text{ м}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

Решение

Введем ИСО: точку отсчета свяжем с неподвижной Землей, положительное направление координатной оси OY укажем по направлению нормального ускорения a_n .

Укажем силы, действующие на летчика (рис. 170), и запишем второй закон Ньютона:

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

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

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

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

Учтем, что по третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$, $\vec{F} = mg$ и $a_n = v^2/R$.

Получаем $P - mg = m \cdot v^2/R \Rightarrow R(P - mg) = m \cdot v^2 \Rightarrow$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{R(P - mg)}{m}}.$$

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \text{м/с},$$

$$v = \sqrt{\frac{(7200 - 800) \cdot 250}{80}} = 141 \text{ (м/с)}.$$

Ответ: скорость самолета в нижней точке траектории равна 141 м/с, или 504 км/ч.

Задача 4. При выполнении фигуры высшего пилотажа — петли Нестегрова — в верхней точке траектории самолет имеет скорость 540 км/ч. Масса летчика 80 кг, радиус петли 450 м. Каков вес летчика, когда самолет находится в верхней точке траектории? Сравните вес летчика и силу тяжести, действующую на него.

$$P = ? \quad P \vee F$$

$$v = 540 \text{ км/ч} = 150 \text{ м/с}$$

$$m = 80 \text{ кг}$$

$$R = 450 \text{ м}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

Обратите внимание! Сила реакции опоры направлена вниз.

Запишем второй закон Ньютона:

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

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

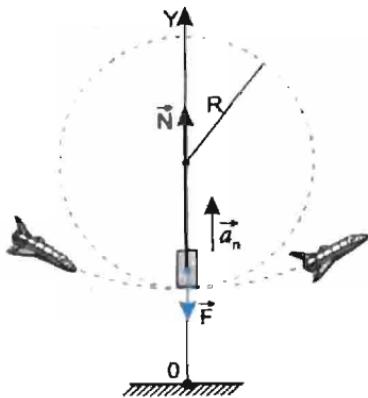


Рис. 170

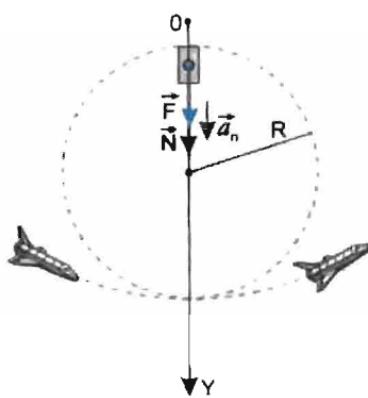


Рис. 171

Решение

Введем ИСО и укажем силы, действующие на летчика (рис. 171).

Запишем уравнение движения тела (второй закон Ньютона) в проекции на координатную ось OY :

$$F + N = ma_n.$$

Учтем, что по третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$, $F = mg$ и $a_n = v^2/R$.

Получаем $P = ma_n - mg \Rightarrow P = m(v^2/R - g)$.

$$P = 80 (22\ 500/450 - 10) = 80 (50 - 10) = 80 \cdot 40 = 3200 \text{ (Н)}.$$

$$F = mg.$$

$$F = 800 \text{ Н},$$

$P > F$ в 4 раза.

Ответ: вес летчика 3200 Н; вес летчика больше силы тяжести, действующей на него, в 4 раза.

- ? 1. Что такое вес тела? 2. Какой природы вес тела? Ответ обоснуйте. 3. К чему приложен вес тела и как направлена эта сила? 4. Чему равен вес тела, если опора вместе с телом поконится или движется равномерно и прямошлифовано вверх (вниз)? 5. Как изменяется вес тела при его ускоренном движении вверх, вниз (при $\vec{a} < \vec{g}$)? * 6. Что такое перегрузка? коэффициент перегрузки? * 7. Как влияет перегрузка на организм человека? Ответ обоснуйте примерами. 8. Что такое невесомость? 9. Можно ли говорить, что в состоянии невесомости силы на тело не действуют? * 10. Как влияет состояние невесомости на организм человека? Ответ обоснуйте примерами. 11. В какие моменты времени движения тела, брошенное вертикально вверх, находится в состоянии невесомости? Сопротивлением воздуха можно пренебречь.

◆ Приборы и материалы: динамометр лабораторный, груз из набора по механике, цилиндр (железный, стальной и др.).

- Подвесьте к крючку динамометра груз из набора по механике. Какие силы действуют на груз? Чему равен вес груза?
- Быстро поднимите динамометр с грузом вверх. Чему равен вес груза в этом случае?
- Быстро опустите динамометр с грузом вниз. Чему равен вес груза в этом случае?
- Повторите опыты 2 и 3, но вместо груза из набора по механике подвесьте металлический цилиндр.
- Выводы по результатам эксперимента запишите в тетрадь.

■ 1. После раскрытия парашюта парашютист массой 90 кг движется равномерно. Чему равен вес парашютиста?

2. На рисунке 172 приведен график зависимости скорости от времени $v = v(t)$ скоростного лифта высотной части здания Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ). Масса кабины лифта с пассажирами может достигать 1,5 т. Рассчитайте силу натяжения каната, удерживающего кабину лифта, в интервале времени: а) 0 – 2 с; б) 2 – 10 с.

3. Девочка массой 50 кг качается на качелях с длиной подвеса 4 м. С какой силой она давит на сиденье при прохождении положения равновесия со скоростью 6 м/с?

4. С какой скоростью должен лететь самолет, чтобы при выполнении фигуры высшего пилотажа — петли Нестерова — в верхней точке траектории летчик был в состоянии невесомости? Радиус петли 450 м. Ответ выразите: в м/с и км/ч.

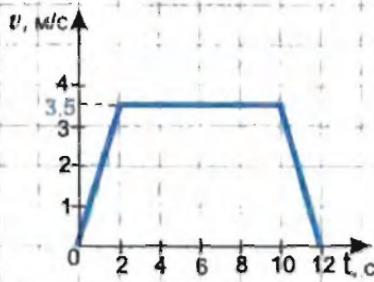


Рис. 172

§ 22. СИЛА ТРЕНИЯ. СУХОЕ ТРЕНИЕ

Почему возникает трение? Возьмем монету и потрем ею о шершавую поверхность. Мы ощутим сопротивление или трение. Если тереть быстрее, монета начнет нагреваться — факт, известный еще человеку каменного века: ведь именно путем трения люди научились добывать огонь. Снова потрем о ту же поверхность, но уже не монетой, а ластиком, и сопротивление резко возрастет. Какова причина возникновения трения?

Одна из причин возникновения трения — наличие шероховатостей у соприкасающихся поверхностей: выступов и впадин (рис. 173). Выступы цепляются друг за друга, деформируются, разрушаются и тем самым препятствуют движению одного тела по поверхности другого. Выступы разрушаются в результате износа труящихся деталей.

Нет сомнения в том, что для уменьшения трения вы предложите отшлифовать или отполировать соприкасающиеся поверхности. Конечно, шлифовка уменьшит трение, но не беспредельно. Возьмем две стеклянные пластинки, проведем пальцами по поверхностям пластинок и убедимся, что они гладкие. Теперь постараемся протащить одну пластинку по поверхности другой, но сделать это нелегко. При увеличении гладкости поверхностей трение на-

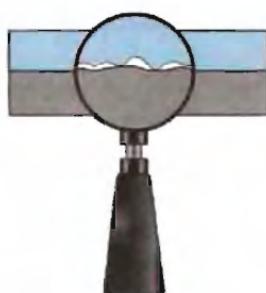


Рис. 173. Неровности поверхности соприкасающихся тел (масштаб не соблюден)

чинает расти. В чем здесь дело? Чем меньше шероховатость поверхностей, тем теснее они прилегают друг к другу, и между молекулами (атомами) соприкасающихся тел начинают проявляться большие силы притяжения. Силы притяжения препятствуют смещению тел относительно друг друга, что и приводит к увеличению трения.

При перемещении шероховатых поверхностей разрушаются связи между молекулами (атомами) бугорков, а при скольжении гладких поверхностей рвутся силы притяжения между молекулами (атомами) соприкасающихся поверхностей. Сумма межмолекулярных (межатомных) сил, возникающих при деформациях и изломах микровыступов соприкасающихся поверхностей, — сила трения ($\vec{F}_{\text{тр}}$). Сила трения — сила электромагнитной природы.

Разрыв межмолекулярных (межатомных) сил — главное отличие силы трения от силы упругости. Если силы упругости всегда направлены перпендикулярно поверхностям соприкасающихся тел, то силы трения направлены вдоль поверхностей соприкасающихся тел.

Силы трения возникают и в том случае, если тело соприкасается с жидкостью или газом. В этом случае говорят о вязком или жидким трении. Если соприкасаются два твердых тела, то говорят о сухом трении. Силы, действующие между поверхностями соприкасающихся твердых тел, называются силами сухого трения.

Трение покоя. Если вы попробуете пальцем сдвинуть лежащую на горизонтальном столе тяжелую книгу, то явно ощутите, что сначала давите на книгу в горизонтальном направлении все с большей силой, а книга остается неподвижной. Она сдвигается с места только тогда, когда усилие достигнет определенной величины. Еще более наглядно подобное явление мы будем наблюдать, если попытаемся передвигать по полу тяжелый холодильник, шкаф с книгами или тумбочку. Мы прикладываем к тумбочке силу \vec{F} , в горизонтальном направлении (рис. 174, а), а она стоит на месте, т. е. скорость и ускорение тумбочки равны нулю.

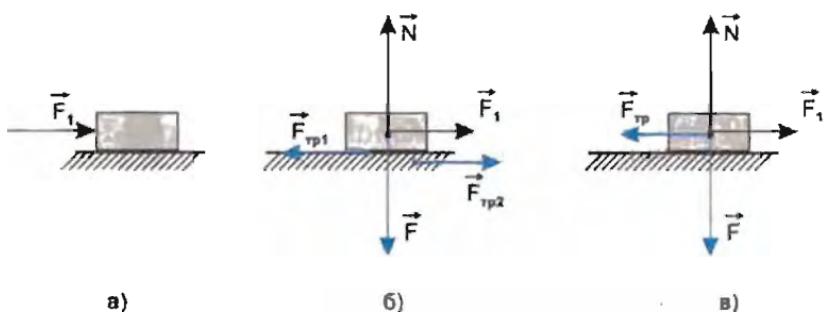


Рис. 174. Трение покоя

лю. Но это возможно только тогда, когда геометрическая сумма сил, действующих на тумбочку в горизонтальном направлении, будет равна нулю. Следовательно, появилась горизонтальная сила, равная по модулю, но противоположно направленная приложенной силе. Эта сила и будет силой трения ($F_{тр1}$), возникающей на границе соприкосновения тумбочки и пола. Сила трения, когда относительная скорость двух соприкасающихся тел равна нулю, называется силой трения покоя. Сила трения покоя равна по модулю приложенной силе, направлена в сторону, противоположную возможному движению тела, параллельна соприкасающимся поверхностям. Сила трения покоя приложена не только к телу (тумбочке), но и к опоре (полу): $F_{тр2}$ (рис. 174, б). Если опора (пол) действует на тело (тумбочку) с силой трения $\vec{F}_{тр1}$, направленной влево, то тело (тумбочка) действует на опору с силой трения покоя $\vec{F}_{тр2}$, направленной вправо. По третьему закону Ньютона $|F_{тр1}| = |F_{тр2}|$. В дальнейшем мы будем указывать только силу трения, действующую на тело; точка приложения силы – центр тяжести тела (рис. 174, в).

Обратите внимание: если параллельно поверхности на тело не действует сила, то сила трения покоя равна нулю. Когда вы оказываете силовое воздействие на тело (тумбочку), возникает сила трения покоя. Чем с большей силой вы действуете на тело (тумбочку), тем большее значение имеет сила трения покоя. Увеличивая силу, действующую на тело (тумбочку), вы в конце концов сдвинете его с места. Следовательно, сила трения покоя может изменяться от нуля до некоторого наибольшего (максимального) значения. Максимальное значение силы трения, при котором скольжение еще не наступает, называется максимальной силой трения покоя. Когда действующая на покоящееся тело сила немного больше максимальной силы трения покоя, то тело начинает скользить. В этом случае на тело (тумбочку) будет действовать уже сила трения скольжения.

От чего зависит максимальная сила трения покоя?

◆ Измерение силы трения покоя

Приборы и материалы: динамометр, деревянный брускок, набор грузов по механике (масса каждого груза 100 г), трибометр (деревянная линейка).

1. Изучите шкалу динамометра: каковы нижний и верхний пределы измерения, цена деления? Какова инструментальная погрешность прибора?

2. Подвесьте брускок к динамометру. Измерьте силу тяжести, действующую на брускок. Чему равна сила упругости?

3. Положите брускок на трибометр гранью с большей площадью поверхности. Прикрепите динамометр к брускок и расположите его параллельно поверхности трибометра (рис. 175, а). Выскажите гипотезу о зависимости силы трения покоя от веса бруска.

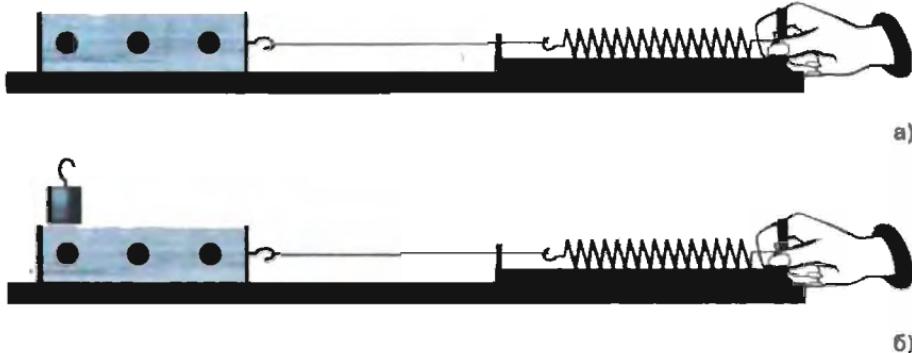


Рис. 175. Измерение силы трения покоя

ска и площади соприкосновения бруска с трибометром. Гипотезу запишите в тетрадь.

4. Начните тянуть за динамометр. Снимите показание динамометра в тот момент, когда бруск начнет трогаться с места. Это значение силы тяги будет равно максимальному значению силы трения покоя. Результат измерения запишите в таблицу.

5. Повторите опыт несколько раз, нагружая бруск одним, двумя, тремя грузами (рис. 175, б). Результаты измерений запишите в таблицу.

6. Переверните бруск на грань с меньшей площадью поверхности. Повторите опыты, нагружая бруск одним, двумя, тремя грузами. Запишите в таблицу результаты измерений максимального значения силы трения покоя. Зависит ли сила трения покоя от площади соприкосновения бруска с трибометром?

7. На основе анализа результатов эксперимента запишите вывод. Подтвердилась ли ваша гипотеза?

| № опыта | Максимальное значение силы трения покоя $\vec{F}_{\text{тр. max}}$, Н |
|---------|------------------------------------------------------------------------|
| | |

Что измеряет динамометр при перемещении бруска? При движении бруска динамометр измеряет силу тяги, т. е. наше мускульное усилие. Когда бруск начнет трогаться с места, сила трения будет равна силе тяги.

Укажем силы, действующие на тело (брюск) (рис. 176). По третьему закону Ньютона $|\vec{N}| = |\vec{P}|$. Значит, максимальная сила трения покоя прямо пропорциональна силе реакции опоры:



$$\vec{F}_{\text{тр. max}} = \mu \vec{N},$$

где μ — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом трения покоя* (μ — буква греческого алфавита, читается «мю»). μ зависит от материала, из которого изготовлены соприкасающиеся тела, качества обработки их поверхности, но не зависит от площади их соприкосновения.

Выразим коэффициент трения покоя:

$$\mu = \frac{|\vec{F}_{\text{тр. max}}|}{|\vec{N}|}, \quad \mu \text{ — безразмерная величина.}$$

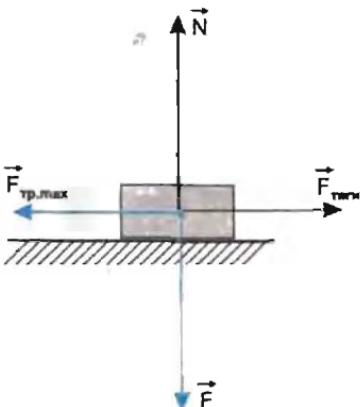


Рис. 176

Коэффициент трения покоя меняет свое значение с изменением приложенной силы от нуля до максимального значения: $0 \leq \mu \leq \mu_1$, где μ_1 — коэффициент трения скольжения.

Трение скольжения. Когда одно тело скользит по поверхности другого, то на него также действует сила трения — *сила трения скольжения*. Если на тело действует постоянная сила тяги и тело движется равномерно ($a = 0$), то максимальное значение силы трения покоя становится равным силе трения скольжения: $F_{\text{тр. max}} = F_{\text{тр}}$. Значит, силу трения скольжения можно рассчитать по формуле

$$F_{\text{тр}} = \mu_1 \cdot N,$$

где μ_1 — коэффициент трения скольжения.

Сила трения скольжения зависит от силы реакции опоры, материала трущихся тел и состояния их поверхностей.

Обратите внимание! Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную перемещению тела (поэтому она всегда тормозит движение).

Модуль силы трения скольжения зависит от скорости движения тела; в этом ее главное отличие от гравитационной силы и от силы упругости, зависящих от координат. В начале скольжения сила трения становится несколько меньше максимальной силы трения покоя. Затем, по мере увеличения скорости, она растет и начинает превышать максимальную силу трения покоя (рис. 177). Вероятно, вы замечали, что тяжелый предмет сначала трудно сдвинуть с места, а потом передвигать его становится легче. Это объясняется уменьшением силы трения скольжения по

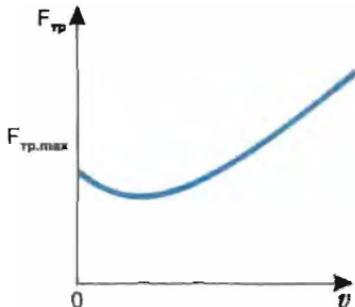


Рис. 177. Зависимость силы трения скольжения от скорости движения тела

сравнению с максимальной силой трения покоя.

При малых скоростях различие значений силы трения скольжения и максимальной силы трения покоя невелико, поэтому в дальнейшем мы его учитывать не будем:



$$\vec{F}_{\text{тр}} \approx \vec{F}_{\text{тр. max}} = \mu \vec{N}.$$

В таблице 9 приведены ориентировочные значения коэффициентов трения покоя и коэффициентов трения скольжения.

Таблица 9

Коэффициент трения

| Трущиеся поверхности | Коэффициент трения, μ | |
|-----------------------------------|---------------------------|------------|
| | покоя | скольжения |
| Дерево по дереву | 0,65 | 0,33 |
| Каучук по дереву или металлу | 0,8 | 0,55 |
| Лед по льду | — | 0,028 |
| Металл по дереву | 0,6 | 0,4 |
| Сталь по льду | 0,02 — 0,03 | 0,015 |
| Ремень кожаный по чугунному шкиву | 0,12 — 0,15 | 0,15 |
| Сталь по стали | 0,11 — 0,12 | 0,05 — 0,1 |
| Кожа по чугуну | 0,15 | 0,15 |

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Приборы и материалы: динамометр, деревянный брусок, трибометр (деревянная линейка), набор грузов по механике (масса каждого груза 100 г).

◆ 1. Изучите шкалу динамометра: каковы нижний и верхний пределы измерения, цена деления? Какова инструментальная погрешность прибора?

2. Подвесьте к динамометру деревянный брусок. Какие силы действуют на брусок? Чему равен вес бруска? В таблицу запиши-

те значение веса бруска с учетом инструментальной погрешности динамометра.

3. Положите бруск на горизонтально расположенный трибометр (см. рис. 175, а). Прикрепите к бруск динамометр, потягните за него и заставьте бруск двигаться вдоль линейки равномерно. Запишите показание динамометра в таблицу (при равномерном движении значение силы трения скольжения равно силе тяги).

4. На бруск поочередно поставьте один груз, два груса и т. д., каждый раз измеряя значение силы трения скольжения. Результаты измерений запишите в таблицу.

| № опыта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| Вес бруска P , Н | | | | | | |
| Сила трения скольжения $F_{тр}$, Н | | | | | | |

5. Используя табличные данные, постройте график зависимости силы трения скольжения от веса тела (по оси абсцисс отложите вес тела P , по оси ординат — силу трения скольжения $F_{тр}$).

6. Используйте график зависимости $F_{тр} = F_{тр}(P)$, рассчитайте значение коэффициента трения скольжения.

7. Сравните полученное вами значение коэффициента трения скольжения с табличным (см. табл. 9).

Трение качения. Когда одно тело катится по поверхности другого, то трение, возникающее при этом, называют *трением качения*.

◆ Измерение силы трения качения

Приборы и материалы: динамометры (с пределом измерения 4 Н и 1 Н), деревянный бруск, деревянные катки одинаковой массы, трибометр (деревянная линейка).

1. Подвесьте поочередно бруск и каток одинаковой массы к динамометру с пределом измерения 4 Н. Сравните показания динамометра. Что вы измеряете с помощью динамометра?

2. На трибометр положите бруск и прикрепите его к динамометру с пределом измерения 4 Н. При равномерном движении бруска измерьте значение силы трения скольжения.

3. На трибометр положите каток и прикрепите к нему динамометр с пределом измерения 1 Н. Потяните за динамометр — каток станет катиться по поверхности трибометра. Можно ли измерить силу трения качения с помощью динамометра с пределом измерения 4 Н? Проверьте экспериментально свое предположение.

4. Сравните значения силы трения скольжения и силы трения качения.

* 5. Возьмите два деревянных катка одинаковой массы, но разного диаметра. Сравните значения силы трения качения при перемещении катков.

6. Результаты измерений и выводы запишите в тетрадь.

Роль сухого трения в природе, технике и быту. Трение покоя, скольжения и качения играет важную роль. Если бы не было трения, мы не могли бы ходить по земле. Чтобы идти, надо от чего-то отталкиваться. Трение позволяет это сделать. Без трения мы не могли бы бегать, ползать, ездить на велосипеде, самокате, мотоцикле, автомобиле. Нам с вами нечего было бы носить — нитки в ткани держатся силами трения. Если бы не было трения, вся мебель в комнате сбилась бы в один угол, тарелки и стаканы не удержались бы на столе, гвозди и шурупы выскочили бы из стен.

Благодаря трению колес о землю или о рельсы самолеты, автомобили и поезда приходят в движение. Поэтому в технике решают задачу не только как уменьшить трение там, где оно мешает движению, но и как увеличить там, где оно помогает создать или передать движение. Тепловозы и электровозы делают тяжелыми, чтобы увеличить трение. В автомобиле движение передается от двигателя к колесам в результате действия сил трения: для увеличения трения диски сцепления автомобиля прижимаются друг к другу сильными пружинами, поэтому возникает большая сила давления и значительно увеличивается сила трения покоя. Силы трения учитывают и для соединения деталей в различных механизмах. С этой целью детали впрессовывают друг в друга — возникают упругие силы, создающие большое давление на поверхность впрессованной детали, и в месте соединения возникают большие силы трения покоя. Силы трения покоя удерживают на месте любую туго завинченную гайку. Если бы не было трения покоя, мы ничего не могли бы взять руками: все предметы выскальзывали бы из рук.

Задумывались ли вы над тем, как из прочных, но довольно коротких волокон хлопка получается длинная нить? Ни клея, ни узелков — ничего этого не используется, а операция выполняется быстро с помощью прядения. Основные этапы прядения — сечение и скручивание нити. Разрозненные волокна благодаря силам трения соединяются в нить.

Человек, обитающий на суше и не умеющий летать, передвигается благодаря особому мелкому гофру на ступне, а также округленному профилю пятки. Мы с вами пользуемся обувью: ведь обувь не только согревает и берегает от травм наши ноги, но и позволяет двигаться по поверхности благодаря трению покоя. Посмотрите на подошву своей обуви. На что вы обратили внимание? Почему нецелесообразно подошву обуви делать гладкой?

Трение скольжения учитывается в тормозных системах сухопутного транспорта (автомобильного, железнодорожного), воздушного транспорта (тормоза у самолетов установлены в шасси).

Многие из вас знают, что для увеличения трения спортсмены натирают обувь канифолью, а музыканты — смычок для увеличения трения о струны во время игры на скрипке или виолончели.

Необходимым условием перемещения является трение (сцепление) между движущимся телом и опорой. Значительное сцепление характерно для рабочих поверхностей органов движения живых организмов. Сцепление достигается либо заострениями на конечностях (когти, острые края копыт, подковные шипы), либо мелкими неровностями (щетинки, чешуйки, бугорки и др.). Необходимо значительное трение и для хватательных органов. Форма хватательных органов различна: либо щипцы, захватывающие предмет с двух сторон, либо тяжи, огибающие предмет (по возможности несколько раз). Посмотрите на свою руку. В руке сочетаются действие щипцов и полный охват со всех сторон; мягкая кожа ладони хорошо сцепляется с шероховатостями предметов, которые она удерживает. У многих растений и животных имеются различные органы, служащие для хватаания (усики растений, хоботы слонов, хвосты лазающих животных и др.). Все они имеют форму, удобную для навивания, или шероховатую поверхность для увеличения коэффициента трения.

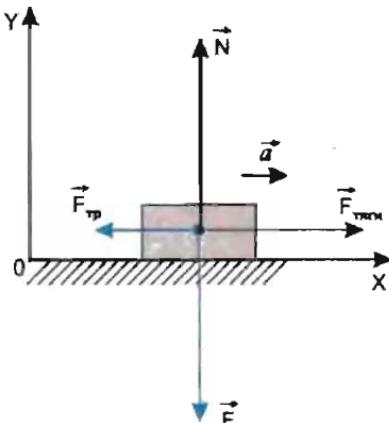


Рис. 178

Пример решения задачи

Автомобиль массой 14 т, трогаясь с места, проходит первые 50 м за 10 с. Чему равна сила тяги, если коэффициент трения равен 0,85?

$F_{\text{тая}} - ?$

$$\begin{aligned}m &= 14 \cdot 10^3 \text{ кг} \\v_0 &= 0 \\s &= 50 \text{ м} \\t &= 10 \text{ с} \\\mu &= 0,85 \\g &\approx 10 \text{ м/с}^2\end{aligned}$$

Решение

На рисунке 178 изобразим силы, действующие на автомобиль; введем инерциальную систему отсчета XOY , связанную с неподвижной Землей.

Используя второй закон Ньютона, запишем уравнение движения автомобиля:

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

$$\vec{F} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тая}} + \vec{F}_{\text{тр}} = m \vec{a}.$$

Запишем последнее уравнение в проекциях на координатные оси OX и OY :

$$OX: F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}} = ma \Rightarrow F_{\text{тяги}} = F_{\text{тр}} + ma, \quad (1)$$

$$OY: -F + N = 0 \Rightarrow N = F \Rightarrow N = mg. \quad (2)$$

Так как $\vec{F}_{\text{тр}} = \mu \vec{N}$, то с учетом формулы (2) получаем

$$F_{\text{тр}} = \mu mg. \quad (3)$$

Ускорение автомобиля определяем из уравнения:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \vec{a} t^2 / 2.$$

В проекции на координатную ось OX

$$s = at^2 / 2 \Rightarrow a = 2s/t^2. \quad (4)$$

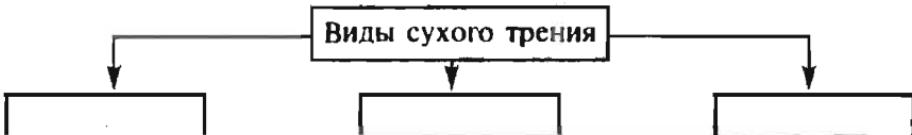
Подставив правые части уравнений (3) и (4) в уравнение (1), получаем $F_{\text{тяги}} = \mu mg + m \cdot 2s/t^2 \Rightarrow F_{\text{тяги}} = m(\mu g + 2s/t^2)$.

$$\begin{aligned} [F_{\text{тяги}}] &= \text{кг}(\text{м}/\text{с}^2 + \text{м}/\text{с}^2) = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = \text{Н}, \\ F_{\text{тяги}} &= 14 \cdot 10^3 (0,85 \cdot 10 + 100/100) = 14 \cdot 10^3 (8,5 + 1) = \\ &= 14 \cdot 10^3 \cdot 9,5 = 133 \cdot 10^3 (\text{Н}) = 133 \text{ кН}. \end{aligned}$$

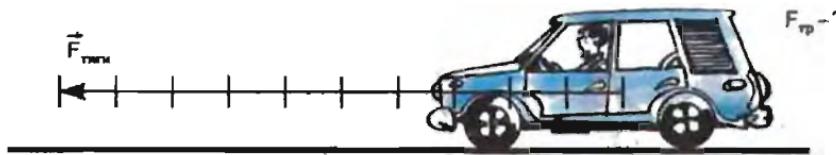
Ответ: сила тяги автомобиля равна 133 кН.

- ? 1. Каковы причины возникновения трения? 2. Какой природы сила трения? 3. К чему приложена и как направлена сила трения покоя? 4. В каком интервале меняется значение силы трения покоя? 5. Каким прибором можно измерить максимальную силу трения покоя? 6. Запишите формулу для расчета максимального значения силы трения покоя. Поясните величины, входящие в эту формулу. 7. От чего зависит коэффициент трения покоя? 8. Как меняется значение коэффициента трения покоя с изменением приложенной силы? 9. По какой формуле можно рассчитать значение силы трения скольжения? Поясните величины, входящие в эту формулу. 10. К чему приложена и как направлена сила трения скольжения? 11. Какое трение называется трением качения? 12. Каково соотношение сил трения скольжения и трения качения? 13. Что означает утверждение: «Коэффициент трения скольжения металла по дереву 0,4; стали по льду 0,015?»

- 1. Заполните схему.



2. Используя данные таблицы 9, сравните коэффициенты трения покоя и скольжения дерева по дереву, каучука по дереву, металла по дереву. Какой вывод вы можете сделать?



Масштаб: 1 деление = 100 Н

Рис. 179

3. Выберите правильный ответ.

При равномерном скольжении бруска по деревянной линейке ученица измерила значение силы тяги. Оно оказалось равным 1,5 Н. Чему равно значение силы трения скольжения?

- A. 0. Б. 0,5 Н. В. 1 Н. Г. 1,5 Н.**

4. Автомобиль движется равномерно. Используя рисунок 179, определите силу трения, действующую на автомобиль. Укажите точку приложения, направление и модуль силы трения. Масштаб указан на рисунке.

5. Мальчик везет санки с грузом, прикладывая силу тяги 30 Н (рис. 180). Сила трения скольжения равна 5 Н. Какие силы действуют на санки с грузом? Изобразите схематично силу тяги и силу трения, действующие на санки с грузом. Масштаб выберите самостоятельно.



Рис. 180

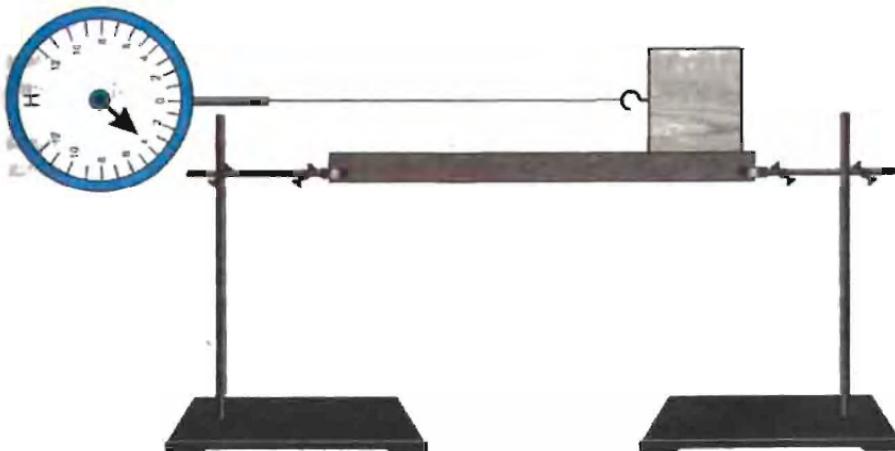


Рис. 181

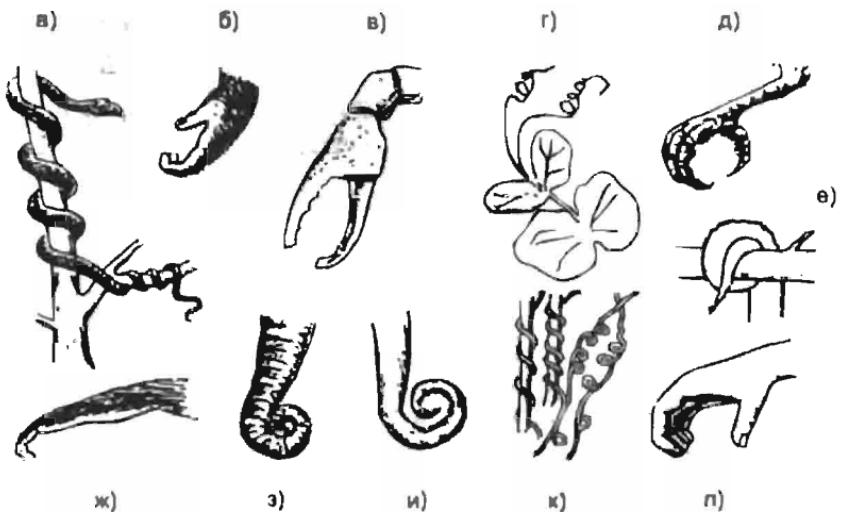


Рис. 182. Различные органы живых организмов, способствующие сцеплению между телом и опорой

6. На рисунке 181 изображено равномерное движение деревянного бруска массой 1,6 кг по деревянной линейке. Укажите точку приложения, модуль и направление сил, действующих на брускок. Масштаб выберите самостоятельно.

7. У многих растений и животных имеются различные органы с шероховатой поверхностью, служащие для хватаания, навивания. Некоторые из них изображены на рисунке 182. Внимательно рассмотрите рисунок. Какую роль в передвижении живых организмов играют эти органы?

1. Автомобиль массой 2 т трогается с места и движется с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. Чему равна сила тяги при разгоне автомобиля, если коэффициент трения 0,6?

2. Троллейбус массой 10 т, трогаясь с места, на пути 50 м приобрел скорость 10 м/с. Чему равен коэффициент трения, если сила тяги равна 14 кН?

3. Автомобиль движется по горизонтальному участку дороги со скоростью 20 м/с. Рассчитайте минимальное время движения автомобиля при торможении до полной остановки, если коэффициент трения колес о дорогу равен 0,4.

◆ 1. Перекиньте через палку веревку и потяните ее за любой конец. Веревка легко скользит по палке. Намотайте веревку несколько раз вокруг палки и снова потяните за конец. Объясните наблюдаемое явление. Что можно сказать о силе трения в этом случае — увеличилась она или уменьшилась?

2. Зависимость силы трения скольжения от состояния труящихся поверхностей

Приборы и материалы: деревянная линейка (одна поверхность гладкая, на другую наклеена наждачная бумага), динамометр, деревянный брускок, набор грузов по механике.

1. На гладкую поверхность деревянной линейки положите брускок и прикрепите его к динамометру. При равномерном скольжении бруска по поверхности линейки снимите показание динамометра и запишите значение силы трения скольжения в таблицу.

2. Нагружая брускок сначала одним, затем двумя и тремя грузами, измерьте и запишите в таблицу значение силы трения скольжения.

3. Переверните линейку наждачной бумагой вверх. Положите сверху деревянный брускок и прикрепите его к динамометру. При равномерном скольжении бруска по наждачной бумаге снимите показание динамометра и запишите значение силы трения скольжения в таблицу.

4. Нагружая брускок сначала одним, затем двумя и тремя грузами, измерьте и запишите в таблицу значение силы трения скольжения.

| № опыта | Сила трения скольжения $F_{тр}$, Н | |
|---------|-------------------------------------|---------------------|
| | по гладкой поверхности | по наждачной бумаге |
| | | |

5. Сравните значения силы трения скольжения. На основе анализа экспериментальных данных запишите вывод в тетрадь.

§ 23. СИЛА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

И вдруг прыжок,
И вдруг летит,
Летит как пух из уст Эола...

А. Пушкин

Жидкое трение. Если твердое тело взаимодействует с другим, не твердым телом, а с жидкостью или газом, то также возникает сила, тормозящая движение, — *сила жидкого (вязкого) трения, или сила сопротивления*. Сила сопротивления (сила жидкого трения) возникает и при движении одного слоя жидкости (газа) относительно другого.

При малых скоростях жидкости (газа) и тела жидкое трение принципиально отличается от сухого трения. Главное отличие:

случае жидкого трения отсутствует сила трения покоя. Если тяжелая деревянная доска лежит на берегу пруда на песке, то мы имеем дело с сухим трением. Чтобы сдвинуть доску с места, т. е. сообщить ей скорость, нам необходимо преодолеть достаточно большую максимальную силу трения покоя. Если же эта доска плавает в пруду, то достаточно приложить к ней небольшую силу, чтобы доска приобрела начальную скорость (значит, и ускорение); этот факт подтверждает, что отсутствует сила трения покоя. Именно поэтому маленький катерок может перемещаться по акватории порта огромные океанские лайнеры (пусть и с малыми скоростями). Но если лайнер сядет на мель, то появится сухое трение, и чтобы сдвинуть его с места (снять с мели), потребуется приложить большую силу.

Второе существенное отличие жидкого трения от сухого: если при сухом трении сила трения скольжения практически не зависит от скорости движущихся тел, то в случае жидкого трения эта зависимость становится принципиально важной. При малых скоростях движения в жидкости (газе) сила жидкого (вязкого) трения (сила сопротивления) прямо пропорциональна скорости движения твердого тела относительно среды:

$$F_c = kv,$$

где k – коэффициент сопротивления, зависящий от свойств жидкости или газа, их плотности, вязкости, температуры, а также от формы твердого тела и состояния его поверхности. В Международной системе единиц (СИ) $[k] = \text{кг}/\text{с}$; его значение определяется экспериментально.

Примерный характер зависимости модуля силы сопротивления от модуля скорости приведен на рисунке 183. Если тело неподвижно относительно жидкости или газа, то сила сопротивления равна нулю. С увеличением скорости движения твердого тела относительно среды сила сопротивления вначале растет медленно, а затем все быстрее и быстрее.

При больших скоростях движения твердого тела относительно среды сила сопротивления прямо пропорциональна квадрату скорости.

Необходимо помнить, что во всех случаях сила трения направлена в сторону, противоположную направлению скорости движения тела.

От чего зависит сила сопротивления?

Сила сопротивления зависит от свойств среды – вязкости среды. Вязкость – свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление движению.

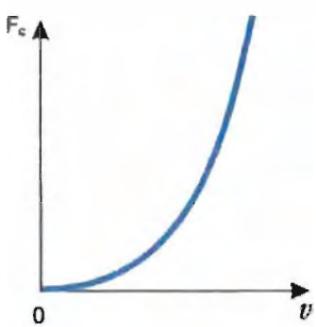


Рис. 183. Зависимость силы сопротивления от скорости движения тела

* В таблице 10 приведены значения вязкости некоторых газов и жидкостей.

Таблица 10

Вязкость газов и жидкостей
(при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении)

| Газ | Вязкость, 10^{-6} Па·с | Жидкость | Вязкость, 10^{-6} Па·с |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Азот | 17,5 | Вода | 1004 |
| Водород | 8,8 | Кровь | 4500 |
| Воздух | 18,2 | Масло машинное | $240 \cdot 10^6$ |
| Гелий | 19,6 | Масло подсолнечное | 50 000 |
| Кислород | 20,2 | Мёд | $650 \cdot 10^4$ |
| Метан | 10,8 | Молоко цельное | 1790 |
| Оксид углерода (IV) | 14,6 | Рыбий жир | 45 600 |
| Спирт этиловый (пары) | 8,3 | Спирт этиловый | 1190 |

Сила сопротивления зависит от формы тела. На рисунке 184 показаны тела различной формы, но с одинаковой площадью поперечного сечения. При движении тела в жидкости или газе наибольшая сила сопротивления действует на плоскую шайбу (\vec{F}_1), наименьшая – на тело сигарообразной формы. Особенно

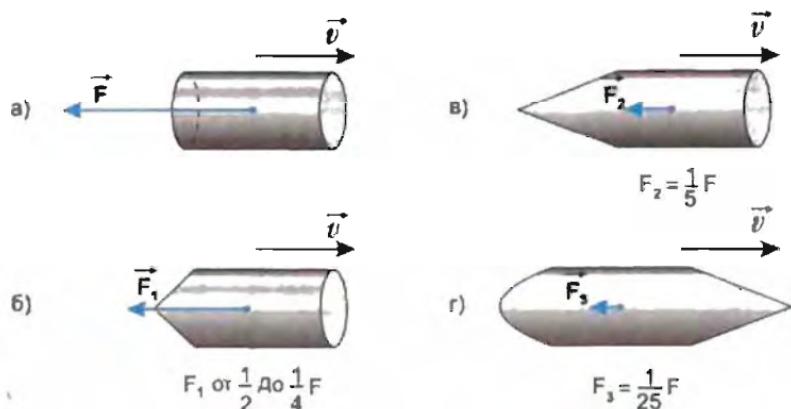


Рис. 184. Зависимость силы сопротивления от формы тела: а) плоская шайба; б) и в) конусообразная форма; г) сигарообразная форма

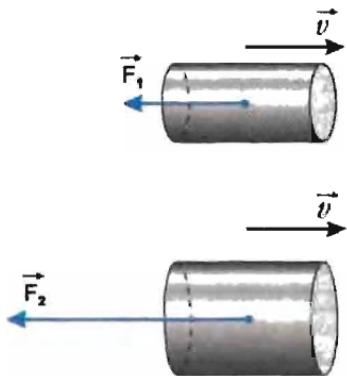


Рис. 185. Зависимость силы сопротивления от площади лобового сечения

автомобиля водитель нажимает на тормоз, колеса останавливаются, и между ними и асфальтом (булыжным покрытием и др.) возникают большие силы трения скольжения, направленные против направления движения. При этом автомобиль пройдет некоторый путь от начала торможения до полной остановки. **Расстояние, которое проходит автомобиль с момента начала торможения до полной остановки, называется тормозным путем.**

Рассчитаем тормозной путь s автомобиля. Представьте, что перед движущимся автомобилем неожиданно появилось какое-то препятствие и водитель отключил двигатель, но включил тормоз. Опишем движения автомобиля: введем инерциальную систему отсчета XOY , укажем силы, действующие на тело (рис. 186), запишем уравнение движения тела.

Используя второй закон Ньютона, запишем уравнение движения автомобиля:

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

$$\vec{F} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}.$$

Запишем последнее уравнение в проекциях на координатные оси OX и OY :

$$OX: F_{\text{тр}} = ma, \quad (1)$$

$$OY: -F + N = 0 \Rightarrow N = F \Rightarrow N = mg. \quad (2)$$

$$|\vec{F}_{\text{тр}}| = \mu |\vec{N}| \Rightarrow F_{\text{тр}} = \mu mg. \quad (3)$$

Используем уравнение кинематики: $v^2 - v_0^2 = 2as$.

Запишем его в проекции на координатную ось OX , учитывая, что автомобиль останавливается ($v = 0$):

$$-v_0^2 = -2as \Rightarrow v_0^2 = 2as \Rightarrow a = v_0^2/2s. \quad (4)$$

велика сила сопротивления, возникающая при движении полусферы вогнутой стороной вперед. Вы, вероятно, обращали внимание на то, что раскрытые парашюты часто имеют форму полусферы.

Если тела одинаковой формы, но имеют разные площади поперечного (лобового) сечения, то сила сопротивления различна: $|F_2| > |F_1|$ (рис. 185). Поэтому не случайно транспортным средствам (автомобилям, самолетам и др.) стремятся придать обтекаемую форму и уменьшить площадь их лобового сечения.

Тормозной путь автомобиля. При необходимости срочной остановки

автомобиля водитель нажимает на тормоз, колеса останавливаются, и между ними и асфальтом (булыжным покрытием и др.)

возникают большие силы трения скольжения, направленные против направления движения. При этом автомобиль пройдет некоторый путь от начала торможения до полной остановки. **Расстояние, которое проходит автомобиль с момента начала торможения до полной остановки, называется тормозным путем.**

Рассчитаем тормозной путь s автомобиля. Представьте, что перед движущимся автомобилем неожиданно появилось какое-то препятствие и водитель отключил двигатель, но включил тормоз. Опишем движения автомобиля: введем инерциальную систему отсчета XOY , укажем силы, действующие на тело (рис. 186), запишем уравнение движения тела.

Используя второй закон Ньютона, запишем уравнение движения автомобиля:

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

$$\vec{F} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}.$$

Запишем последнее уравнение в проекциях на координатные оси OX и OY :

$$OX: F_{\text{тр}} = ma, \quad (1)$$

$$OY: -F + N = 0 \Rightarrow N = F \Rightarrow N = mg. \quad (2)$$

$$|\vec{F}_{\text{тр}}| = \mu |\vec{N}| \Rightarrow F_{\text{тр}} = \mu mg. \quad (3)$$

Используем уравнение кинематики: $v^2 - v_0^2 = 2as$.

Запишем его в проекции на координатную ось OX , учитывая, что автомобиль останавливается ($v = 0$):

$$-v_0^2 = -2as \Rightarrow v_0^2 = 2as \Rightarrow a = v_0^2/2s. \quad (4)$$

Правые части уравнений (3) и (4) подставим в уравнение (1). Получаем $\mu mg = m v_0^2 / 2s \Rightarrow \mu g = v_0^2 / 2s \Rightarrow s = v_0^2 / 2\mu g$.

Обратите внимание! Тормозной путь прямо пропорционален квадрату начальной скорости движения.

Если скорость автомобиля увеличится в 2 раза, то тормозной путь автомобиля будет большим в 4 раза. Это следует учитывать и об этом необходимо помнить не только водителям всех транспортных средств, но также и пешеходам.

В таблице 11 приведены установленные экспериментально средние значения тормозного пути при движении автомобиля по горизонтальному участку дороги при различных дорожных условиях.

1. При движении по сухому, чистому асфальтобетону (коэффициент трения шин с дорогой $\mu = 0,85$);
2. При движении по сухой булыжной или шебеночной дороге или по мокрому асфальтобетону ($\mu = 0,6$);
3. При движении по дороге со скользким покрытием (обледенелая дорога и др., $\mu = 0,2$).

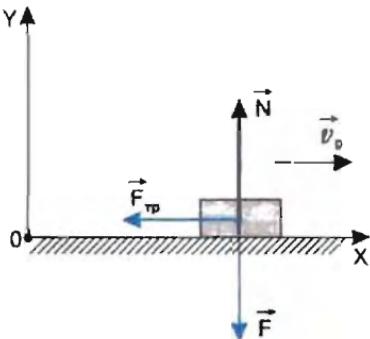


Рис. 186

Таблица 11

Тормозной путь автомобиля s , м

| Тип автомобиля | Дорожные условия, μ | Начальная скорость движения v_0 , км/ч | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| Легковые | 1 | 0,85 | 3,6 | 7,2 | 12 | 18 | 25,2 | 33,6 | 43,2 |
| | 2 | 0,6 | 4,6 | 9,5 | 16 | 24,2 | 34,2 | 45,9 | 59,3 |
| | 3 | 0,2 | 12 | 26,1 | 45,6 | 70,5 | 101 | — | — |
| Грузовые, автобусы, автопоезда с пневматическим тормозом | 1 | 0,85 | 6,2 | 11,9 | 19,2 | 28,2 | 39 | 51,5 | 67,5 |
| | 2 | 0,6 | 7,6 | 15 | 24,8 | 37 | 51,6 | 68,6 | 88 |
| | 3 | 0,2 | 7,2 | 36,8 | 63,2 | 97 | 138 | — | — |

* **Роль жидкого трения в природе, технике и быту.** Строение и функционирование живого организма — результат длительной эволюции. Сама природа сконструировала живые организмы так,

чтобы уменьшить трение как внутри организмов, так и для обеспечения их передвижения.

В окружающей нас природе мы можем увидеть много примеров проявления жидкого трения. В частности, знакомый нам всем одуванчик или тополь, как бы заботясь о своем потомстве, производит очень легкие семена, снабженные большой, пушистой оболочкой. Так как масса этих семян мала, то под действием силы тяжести они приобретают малую вертикальную скорость. Но поскольку коэффициент сопротивления k велик, то эта скорость создает достаточную силу сопротивления, которая и компенсирует действие силы тяжести. Семя одуванчика или пух тополя как бы парят в воздухе. Поэтому при сильном ветре эти семена могут переноситься на большие расстояния. Известны случаи, когда семена некоторых растений, переносимые сильными ветрами, осуществляли распространение этих видов растений на острова, находящиеся в Мировом океане в сотнях километров друг от друга. Степное растение перекати-поле использует трение качения: после созревания плодов наземная часть его отламывается от корня, приобретает шаровидную форму и, гонимая ветром, легко катится по земле, рассеивая семена. Многие плоды и семена снабжены поддерживающимися плоскостями в форме отростков и выступов (хвойные растения, клен, береза, липа, многие зонтичные); некоторые снабжены «планерами».

Перья птиц, налегая друг на друга, образуют сплошную гладкую, обтекаемую поверхность, что уменьшает трение и облегчает передвижение в воздухе. Крылья же птиц увеличивают его общую поверхность и площадь опоры о воздух, что способствует возрастанию силы тяги. Хвост же, как руль, управляет полетом.

Мы обсуждали вопрос о том, что для сухопутного передвижения живые организмы используют хождение и ползание. Но есть еще такой способ передвижения, как бег, чрезвычайно распространенный у животных. При беге периодически возникают моменты, когда ни одна из ног не касается земли (чего нет при перемещении шагом). С помощью киносъемок установлено, что движение лошади рысью — бег, а не ходьба. Кенгуру сочетает ходьбу с прыжками, причем эти прыжки достигают многих метров в длину.

Животные, живущие в воде, передвигаются с разной скоростью. Некоторые рыбы в погоне за добычей развивают большую скорость. Тунец, например, плывет со скоростью 82–90 км/ч, а меч-рыба — со скоростью 130 км/ч. Скорость же карася составляет всего 6–7 км/ч. На скорость передвижения животных в воде влияет форма их тела. Многие животные (рыбы, тюлени, акулы, моржи, дельфины и др.) имеют обтекаемую форму тела: заостренная голова сразу переходит в туловище, шея отсутствует, поэтому тело этих животных напоминает цельный и крепкий клин, который легко «пробивает дорогу» в толще воды.

Не менее важное влияние на скорость передвижения многих животных (рыбы, лягушки и др.) оказывает слизь, покрывающая их тело. Слизь — своеобразная смазка, которая уменьшает силу сопротивления движению этих животных в воде.

Известно, что рыбы перемещаются косяками. Мелкие морские рыбки ходят стайкой, похожей на каплю, при этом сопротивление воды движению стайки наименьшее. Многие птицы во время перелетов собираются в цепочку или косяк. В последнем случае более сильная птица летит впереди, ее тело рассекает воздух подобно тому, как киль корабля — воду. Остальные птицы летят таким образом, чтобы сохранить острый угол косяка — это способствует уменьшению сопротивления воздуха.

Поразительным образом решается в живой природе инженерная задача равномерного прокачивания жидкостей по трубам. В момент рабочего хода сердца артерии упруго расширяются, накапливая энергию. В промежутках между сокращениями сердечных мышц скопленная в артериях энергия проталкивает кровь дальше, в более мелкие сосуды, обеспечивая не только постоянство скорости движения, но и меньший расход энергии. Упругость сосудов возникает благодаря наличию в артериальных стенах особого вещества — эластина. Снижению потерь на трение способствует особый режим течения крови в периодически расширяющихся и сжимающихся сосудах.

Решена природой проблема трения и изнашивания в суставах. Наиболее яркий пример — тазобедренный сустав человека. Этот сустав выдерживает ежедневные динамические нагрузки, превышающие 1000 Н при прыжках, в нем практически отсутствует трение и изнашивание. Как же достигается подобное совершенство? Приведем модель работы тазобедренного сустава. Поверхности сустава покрыты особой хрящевой тканью, пропитанной синовиальной жидкостью. Эта жидкость по своему составу сходна с плазмой крови, но обладает большей вязкостью, чем кровь. Под внешней нагрузкой, например при ходьбе, синовиальная жидкость начинает выдавливаться из капилляров хряща, усиливая смазочное действие. В результате коэффициент трения оказывается малым, приблизительно равным 0,003. Есть данные о том, что синовиальная жидкость обладает способностью резко увеличивать вязкость под давлением. В итоге процесс выдавливания смазки из хряща автоматически регулируется под действием нагрузки. По некоторым данным синовиальная жидкость обладает свойствами жидких кристаллов. В 7 классе мы обсуждали вопрос о том, что молекулы жидких кристаллов способны менять ориентацию и изменять свойства среды под действием слабых электрических и магнитных полей. Такие поля есть и в нашем организме. Возможно, что эти поля оказывают влияние на работу суставов и исключают их усталость и изнашивание. Трение мышц и сухожилий о кость уменьшается благодаря выделению специальной жидкости сумками, в которых они находятся.

Окружающая водная и воздушная среда оказывает значительное сопротивление, причем чем больше скорость движения, тем больше сопротивление. При равномерном движении океанского лайнера со скоростью 26 км/ч потери на трение о воду составляют примерно 75% мощности двигателей. Хотя атмосфера у земной поверхности примерно в 800 раз менее плотная, чем морская вода, но и она может создавать огромное сопротивление. Так, колесный поезд обычной формы при скорости 200 км/ч затрачивает на преодоление сопротивления воздуха около 70% всей мощности двигателей. Трение о воздух приводит к опасному перегреву обшивки самолета, особенно при полетах в плотных слоях атмосферы. При запуске космического корабля обшивка его испытывает большое трение о воздух и нагревается. При возвращении на Землю корабль теряет большую часть своей кинетической энергии за счет трения о верхние слои атмосферы. Помимо значительных перегрузок, вызванных торможением, наружная оболочка летательного аппарата испытывает сильный нагрев, приводящий к испарению обшивки, буквально объятым пламенем. Ставшая ненужной на завершающей стадии посадки двигательная система корабля отделяется от кабины с помощью специальных пиропатронов, и лишь после этого скорость снижается настолько, что можно раскрыть парашют и плавно приземлиться.

Человек использует результаты исследований в научных лабораториях и знания об особенностях форм тела водных и воздушных животных, способствующих уменьшению сопротивления в воде и воздухе, увеличению скорости движения, сооружает лодки, корабли, самолеты, ракеты с заостренными «носами», придает им обтекаемую форму. В авиации подбирают оптимальный профиль крыльев и хвостового «оперения» самолета, снабжают его устройствами, с помощью которых пилот может регулировать обтекаемость на разных стадиях полета. Крыльям сверхзвуковых самолетов придают стреловидную форму или вид греческой буквы «дельта»; передняя кромка таких крыльев заострена. Самолеты, способные двигаться со сверхзвуковыми скоростями, снабжаются устройствами для изменения геометрии крыла или же частичного убирания крыла.

Вы знаете, что сила жидкого (вязкого) трения обычно в несколько раз меньше силы сухого трения. Этим обстоятельством пользуются в тех случаях, когда необходимо уменьшить силы трения в трущихся частях различных механизмов. В этих случаях используют смазку в виде масел, которые, образуя между трущимися поверхностями тонкий слой жидкости, существенно снижают трение. Современные автомобили имеют разветвленную систему принудительной смазки (смазочное масло подается специальным насосом в зоны трения по многочисленным маслопроводам). Стенки цилиндра автомобильного двигателя смазываются путем разбрзгивания масла. В старых моделях автомобилей имелись места, куда густая смазка периодически вдавливала с

помощью специальных масленок. Аналогичные способы смазки применяются в большинстве машин и приборов (от простого велосипеда, швейной машины до реактивного лайнера или сверхмощной турбины).

При ходьбе на лыжах сочетаются два вида трения: жидкое трение, возникающее в результате таяния снега при скольжении лыжи и дающее минимум сопротивления движению, и сухое трение (трение покоя), обеспечивающее сильный толчок в момент, когда лыжа неподвижна. Малое трение конька конькобежца обеспечивается таянием льда в результате его трения о лед. Сухое трение, необходимое для таяния льда, обязательно возникает лишь в передней части конька, постоянно набегающего на свежий лед. Все дальнейшее зависит от последующего перераспределения тепла в зоне контакта лезвия конька со льдом. Не менее важную роль играют тепловые свойства и состояние половьев в саночном спорте.

При скоростном спуске на санях и горных лыжах, беге на коньках костюмы и снаряжение спортсменов должны быть максимально обтекаемыми, чтобы свести к минимуму сопротивление воздуха. Поэтому используют специальные ткани и материалы.

На транспорте трение можно свести к минимуму, нагнетая воздух между соприкасающимися поверхностями (например, судна на воздушной подушке) или подвесив движущийся предмет на магнитах (например, вагон над рельсами).

В настоящее время практически во всех отраслях промышленности (включая ядерную энергетику) наряду с жидкой смазкой используется *твердая смазка* — графит, молибден (природные вещества) и тефлон (искусственное вещество).

В морском деле, авиации, космонавтике широко применяются чувствительные навигационные приборы, где трение сведено к минимуму. Эти приборы безупречно функционируют в широком диапазоне температур и давлений. Поэтому создание смазочных материалов — серьезная научная задача.

? 1. В каком случае говорят о жидком или вязком трении? 2. В чем принципиальные отличия жидкого трения от сухого трения? 3. От чего зависит сила жидкого трения (сила сопротивления)? Ответ обоснуйте. 4. Что такое тормозной путь автомобиля? Почему необходимо знать тормозной путь? 5. От каких величин зависит тормозной путь транспортных средств?

●* 1. Используя текст § 23, приведите примеры проявления жидкого трения в природе, технике и быту.

2. На рисунке 187 изображено движение парашютиста с раскрытым парашютом вблизи поверхности Земли.

1) Какую форму имеет раскрытый парашют? Как это влияет на силу сопротивления движению парашютиста?



Рис. 187

2) Сделайте схематический рисунок, указав силы, действующие на парашютиста, при условии:

- а) парашютист движется равномерно;
 - б) парашютист движется неравномерно.
3. Используя рисунки 177 и 183, сравните зависимости силы трения скольжения и силы сопротивления от скорости движения тела. Какой вывод вы можете сделать из анализа графиков?
4. Используя данные таблицы 10, сравните вязкость воды и крови; машинного и подсолнечного масла; этилового спирта и паров этилового спирта; воздуха, гелия и кислорода.

5. Используя данные таблицы 11:

1) сравните тормозной путь легкового автомобиля, имеющего начальную скорость движения 60 км/ч, при разных дорожных условиях. Какой вывод можно сделать?

2) сравните тормозной путь автобуса имеющего начальную скорость 50 км/ч, при разных дорожных условиях. Какой вывод можно сделать?

3) сравните тормозной путь грузового автомобиля, движущегося по мокрому асфальту, при разных начальных скоростях. Какой вывод можно сделать?

4) сравните тормозной путь легкового и грузового автомобилей, имеющих одинаковую начальную скорость движения ($v_0 = 60$ км/ч). Какой вывод можно сделать?

■ 1. Легковой автомобиль движется по сухому асфальтобетону с начальной скоростью 40 км/ч. Рассчитайте время, за которое автомобиль остановится при резком торможении. Необходимые дополнительные данные вы можете найти в таблице 11.

2. Грузовой автомобиль движется по двум участкам шоссе: по сухому и обледенелому асфальтобетону. Каким должно быть отношение начальных скоростей при торможении, чтобы тормозной путь автомобиля на этих участках был одинаков? Необходимые для решения данные вы можете найти в таблице 11.

3. Грузовой автомобиль движется по сухой бульжной дороге. Водитель нажимает на тормоз, и автомобиль останавливается в течение 5 с. С какой скоростью двигался автомобиль? Каков тормозной путь автомобиля? Необходимые для решения данные вы можете найти в таблице 11.

ГЛАВА III. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

В результате взаимодействия тел могут непрерывно изменяться не только их координаты и скорости, но и силы, действующие между телами. Такие ситуации возникают при различных ударах и столкновениях твердых тел, когда деформации зависят от конструкции тел, их формы и условий столкновения, а также во время взрывов, когда давление газов от сгорания взрывчатки меняется по сложному закону. Для описания подобных ситуаций в механике введены специальные величины, значение которых не изменяется при взаимодействии тел: *импульс* и *энергия тела*. Соотношения между сохраняющимися величинами получили название *законов сохранения*. Мы рассмотрим закон сохранения импульса тела и закон сохранения механической энергии. Законы сохранения — фундаментальные законы физики: они применимы как к земным, так и к космическим телам, элементарным частицам.

Законы классической механики (законы Ньютона) применимы для тела (материальной точки). Законы сохранения в механике справедливы для системы тел (совокупности материальных точек), взаимодействующих между собой. Такой системой можно считать Солнечную систему, в которой планеты могут рассматриваться как материальные точки.

§ 24. ИМПУЛЬС ТЕЛА. ИМПУЛЬС СИЛЫ

В механике под термином «импульс» понимают две величины: импульс тела и импульс силы (от лат. *impuls* — толчок).

Импульс тела. Импульс тела — величина, равная произведению массы тела на его скорость.

Импульс тела обозначается буквой латинского алфавита p (читается «пЭ»):

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

Импульс тела — векторная величина. Так как масса тела $m > 0$, то направление вектора импульса тела совпадает с направлением вектора скорости тела, но в m раз больше по величине (рис. 188).

Единица импульса в СИ не имеет названия, по определению

$[p] = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$ (читается «килограмм на метр в секунду»)

$1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}$ — это импульс тела массой 1 кг , движущегося со скоростью $1 \text{ м}/\text{с}$.



Рис. 188. Направление импульса тела



Декарт Ренé (1596—1650) — французский философ, математик, физик и физиолог. Главные труды по физике — «Начала философии» (1644), «Трактат о свете» (1638). Ввел понятия «количество движения» и «импульс силы», установил закон сохранения количества движения. Высказал предположение, что атмосферное давление с увеличением высоты уменьшается. Первым математически вывел закон преломления света. Построил свою картину мира: образование и движение небесных тел объясняется вихревым движением частиц материи. Предложил обозначать неизвестные буквами x , y , z , а буквенные коэффициенты — a , b . c ввел обозначение степеней и др.

«Вся моя физика есть не что иное, как геометрия».

Р. Декарт

Понятие импульса тела было введено французским ученым Рене Декартом. Он определял импульс как произведение величины тела на скорость его движения (в то время понятие массы еще не было введено). И. Ньютон уточнил определение, он назвал эту величину количеством движения. В своем научном труде «Математические начала натуральной философии» И. Ньютон писал: «Количество движения есть мера такого, устанавливаемая пропорционально скорости и массе».

Импульс силы. Результат взаимодействия тел зависит не только от значения действующей силы, но и от времени действия силы. В этом можно убедиться на опыте. На лист бумаги, лежащий на краю стола, поставим деревянный брускок. Медленно потянем за бумагу. При этом брускок сдвигается с места и будет перемещаться вместе с листом бумаги (рис. 189, а). Если же лист бумаги дернуть резко, то он выдернется из-под бруска, а брускок останется на месте (рис. 189, б).

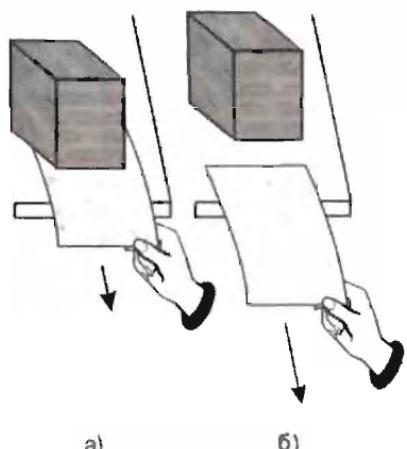


Рис. 189

Произведение силы на время ее действия называют импульсом силы:



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

где \vec{F} — сила, действующая на тело; Δt — время действия силы.

Импульс силы — векторная величина; его направление совпадает с направлением силы. Единица импульса силы в СИ обозначается так: Н·с (читается «ニュ顿 на секунду»).

Соотношение между импульсом тела и импульсом силы. Если на тело действует постоянная сила \vec{F} , то оно приобретает постоянное ускорение \vec{a} :

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t},$$

где \vec{v}_0 — начальная скорость тела; \vec{v} — конечная скорость тела; Δt — интервал времени, в течение которого изменяется скорость.

По второму закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$. Значит, $\vec{F} = m(\vec{v} - \vec{v}_0)/\Delta t$, или $\vec{F}\Delta t = m(\vec{v} - \vec{v}_0) \Rightarrow \vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$.

Но $m\vec{v}_0 = \vec{p}_0$ — импульс тела в начальный момент интервала времени; $m\vec{v} = \vec{p}$ — импульс тела в конечный момент интервала времени.

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

$$\Rightarrow \boxed{\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.}$$

Это уравнение — математическая запись второго закона Ньютона: **изменение импульса тела равно импульсу силы**.

В «Математических началах натуральной философии» был впервые сформулирован второй закон. И. Ньютон дал такое определение закона: «Изменение количества движения пропорционально приложенной силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует».

Направление изменения импульса тела совпадает с направлением силы.

Согласно второму закону Ньютона одинаковые изменения импульса тела могут быть получены в результате действия большей силы в течение малого интервала времени или малой силы в течение большого интервала времени.

На уроках физкультуры вы прыгаете в высоту, совершаете скоки с брусьев, перекладины и других спортивных снарядов, приземляясь на мягкие маты. Задумывались ли вы, почему нужны маты? Когда вы прыгаете с какой-то высоты, то остановка вашего тела происходит за счет действия силы реакции со стороны земли или пола. Чем меньше время столкновения, тем больше тормозящая сила. Для уменьшения этой силы необходимо, чтобы торможение происходило постепенно. Мягкие маты, прогибаясь, не сразу тормозят движение вашего тела.

-
- ? 1. Что такое импульс тела? 2. Запишите формулу расчета импульса тела. Поясните величины, входящие в эту формулу. 3. Какова единица импульса тела? 4. Каково направление импульса тела? Ответ обоснуйте. 5. Чему равен импульс покоящегося тела? 6. Что такое импульс силы? 7. Какова единица импульса силы? 8. Дайте два варианта записи второго закона Ньютона. Поясните величины, входящие в эти уравнения.

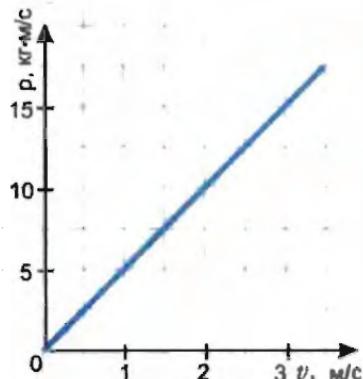


Рис. 190

9. Почему падение циркового артиста с большой высоты на сеть оказывается безопасным, в то время как удар о землю при падении с той же высоты может быть смертельным? Ответ обоснуйте.

1. Выберите правильный ответ.

На рисунке 190 изображен график зависимости импульса тела от скорости движения $p = p(v)$. Чему равна масса тела?

A. 0.

Б. 3 кг.

В. 5 кг.

Г. 15 кг.

Д. По графику нельзя определить массу тела.

2. Тележка массой 0,1 кг движется по горизонтальной поверхности стола со скоростью 5 м/с так, как изображено на рисунке 191. Чему равен импульс тележки и куда он направлен?

А. 5 кг·м/с, влево.

Б. 5 кг·м/с, вправо.

В. 0,5 кг·м/с, влево.

Г. 0,5 кг·м/с, вправо.

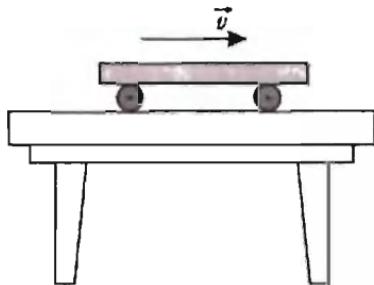


Рис. 191

1. Сравните импульсы мотоцикла массой 154 кг, движущегося со скоростью 36 км/ч, и легкового автомобиля массой 1400 кг, движущегося со скоростью 1,1 м/с.

2. Два шара одинакового объема — березовый и свинцововый — движутся с одинаковыми скоростями. Какой из них обладает большим импульсом и во сколько раз? Плотность бересы $650 \text{ кг}/\text{м}^3$, свинца $11\,350 \text{ кг}/\text{м}^3$.

3. Мотоциклист вместе с мотоциклом массой 220 кг, двигаясь на прямолинейном участке шоссе, увеличил скорость с 3 до 10 м/с. Чему равно изменение импульса?

4. Футбольный мяч массой 0,4 кг после удара, длившегося 0,01 с, приобрел скорость 10 м/с. С какой силой ударили о мяч?

5. В 1933 г. была запущена одна из первых отечественных экспериментальных ракет ГИРД-Х. Она имела стартовую массу 29,5 кг. Сила тяги двигателя в момент старта была 637 Н, а время работы двигателя — 22 с. Какую скорость приобрела ракета после пуска?

6. В 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли. Масса ракеты-носителя и груза равнялась 268 т, сила тяги двигателей — 3 980 кН. Через какое время ракета развila скорость, равную 7,9 км/с?

§ 25. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Замкнутая система тел. Все тела в природе взаимодействуют друг с другом. В некоторых случаях можно пренебречь влиянием других тел, если оно несущественно при описании движения. Так, при расчете траекторий полета космических кораблей внутри Солнечной системы можно пренебречь влиянием сил притяжения со стороны далеких звезд, поскольку эти силы малы по сравнению с силами притяжения корабля к Солнцу и планетам Солнечной системы. Для этого в физике введено понятие **замкнутая, или изолированная, система тел**.

Замкнутой, или изолированной, называют систему тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с телами, не входящими в эту систему.

Понятие «замкнутая система» — идеализация. Но в ряде случаев реальные системы можно рассматривать в качестве замкнутых, если исключить при этом те взаимодействия, которые в данном случае несущественны.

Рассмотрим два примера, когда систему взаимодействующих тел можно рассматривать как замкнутую.

Пример 1. В безветренную погоду человек сидит в лодке, находящейся на поверхности воды. На лодку и человека со стороны Земли действует сила тяжести, а со стороны воды — выталкивающая (архимедова) сила. В вертикальном направлении систему человек—лодка нельзя считать замкнутой. Человек решил перейти с носа на корму лодки. Силой трения о воду можно пренебречь. Поэтому в горизонтальном направлении систему человек—лодка можно считать замкнутой.

Пример 2. Мальчик вбегает на легкоподвижную тележку, стоящую на гладком горизонтальном полу (рис. 192). В вертикальном направлении на тележку и мальчика действует сила тяжести со стороны Земли, со стороны пола на тележку и со стороны тележки на мальчика — сила реакции опоры. В вертикальном направлении систему тележка—мальчик нельзя считать замкнутой. Напротив, в горизонтальном направлении можно пренебречь как силой трения, так и силой сопротивления воздуха. Поэтому в горизонтальном направлении систему

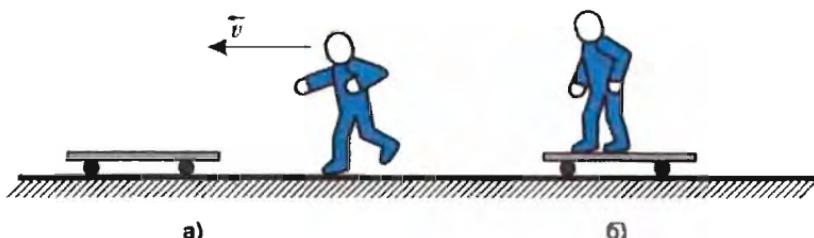


Рис. 192

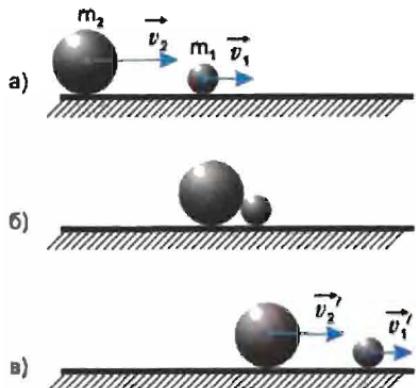


Рис. 193

шаров, попадание ружейной пули в ящик с песком, автосцепка вагонов, столкновение метеорита с Землей или другой планетой.

Под абсолютно упругим ударом понимают столкновение тел, в результате которого не происходит соединения тел в одно целое и их внутренние энергии остаются неизменными. Столкновение реальных тел всегда сопровождается возникновением остаточных деформаций, сил трения, ведущих к потере механической энергии и превращению ее в другие виды. Однако эти потери могут быть настолько малы, что ими можно пренебречь. Так поступают, когда рассматривают, например, столкновение бильярдных шаров.

Закон сохранения импульса. Рассмотрим движение двух упругих шаров массами m_1 и m_2 , движущихся со скоростями v_1 и v_2 , по гладкой горизонтальной поверхности ($v_2 > v_1$) (рис. 193, а). Через некоторое время второй шар догонит первый и произойдет их столкновение (рис. 193, б). После взаимодействия скорости шаров изменятся и станут равными v_1' и v_2' (рис. 193, в).

В вертикальном направлении на каждый из шаров действуют сила тяжести со стороны Земли и сила реакции опоры, поэтому в этом направлении систему нельзя считать замкнутой. В горизонтальном же направлении силой трения можно пренебречь, поэтому систему из двух взаимодействующих шаров можно считать замкнутой.

Запишем второй закон Ньютона для каждого из шаров:

$$\vec{F}_1 \Delta t = \Delta \vec{p}_1, \quad \vec{F}_2 \Delta t = \Delta \vec{p}_2,$$

где \vec{F}_1 и \vec{F}_2 — силы, с которыми шары действуют друг на друга; Δt — время взаимодействия шаров; $\Delta \vec{p}_1$ — изменение импульса первого шара; $\Delta \vec{p}_2$ — изменение импульса второго шара.

Выразим силы $\vec{F}_1 = \Delta \vec{p}_1 / \Delta t$ и $\vec{F}_2 = \Delta \vec{p}_2 / \Delta t$.

Согласно третьему закону Ньютона силы равны по модулю, но противоположны по направлению:

тележка-мальчик можно считать замкнутой.

Столкновение тел. Столкновение тел — одно из наиболее часто встречающихся явлений. Для нас представляют интерес два вида столкновения — абсолютно упругий и абсолютно неупругий удары.

Под абсолютно неупругим ударом понимают столкновение двух тел, в результате которого они соединяются вместе и движутся дальше как одно целое. Примеры неупругого удара: столкновение пластилиновых

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Значит,

$$\Delta \vec{p}_1 / \Delta t = -\Delta \vec{p}_2 / \Delta t \Rightarrow \Delta \vec{p}_1 = -\Delta \vec{p}_2, \\ m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 = -(m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2).$$

Преобразуем это уравнение:

$$m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}'_2 + m_2 \vec{v}_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2.$$

В левой части уравнения суммарный импульс системы до взаимодействия, а в правой — после взаимодействия, т. е. суммарный импульс системы не изменяется (сохраняется).

Закон сохранения импульса можно сформулировать так:
геометрическая сумма импульсов тел, образующих замкнутую систему, до взаимодействия равна геометрической сумме импульсов тел после взаимодействия.

Это выполнимо и при условии, если замкнутую систему образуют не два, а сколько угодно тел.

Математически закон сохранения импульса можно записать так:

••

$$\sum_{i=1}^n \vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}'_i.$$

При решении задач будем использовать запись $\sum \vec{p} = \sum \vec{p}'$.

В общем случае полученный результат можно сформулировать так:

геометрическая сумма импульсов тел, образующих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях и движениях тел этой системы.

Закон сохранения импульса — один из основных законов физики. Суммарный импульс замкнутой системы тел сохраняется независимо от вида взаимодействия между телами, входящими в эту систему. Между телами могут действовать любые силы, в том числе и силы трения, возможны взрыв, химическая реакция, ядерное превращение, но суммарное значение импульса не изменяется:

$$\vec{p} = \text{const.}$$

Пример решения задачи

Тележка с песком массой $M = 0,5$ кг катится без трения по горизонтальным рельсам со скоростью $v_1 = 2$ м/с. Шар массой $m = 20$ г летит горизонтально навстречу тележке со скоростью 7 м/с (рис. 194, а). Он попадает в тележку с песком и застревает в песке (194, б). Рассчитайте сколько

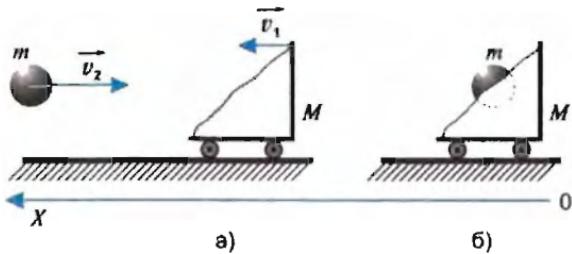


Рис. 194

рость, с которой шар и тележка будут двигаться после попадания шара в тележку.

$$v' = ?$$

$$\begin{aligned}M &= 0,5 \text{ кг} \\v_1 &= 2 \text{ м/с} \\m &= 20 \text{ г} = 0,02 \text{ кг} \\v_2 &= 7 \text{ м/с}\end{aligned}$$

Решение

Так как тележка движется по рельсам без трения, то в горизонтальном направлении систему тележка—шар будем считать замкнутой. Укажем положительное направление координатной оси OX по направлению движения тележки до взаимодействия.

Запишем закон сохранения импульса в векторной форме:

$$\sum \vec{p} = \sum \vec{p}'$$

а затем в проекции на координатную ось OX :

$$Mu_1 - mu_2 = (M + m)v'$$

$$v' = \frac{Mu_1 - mu_2}{M + m}.$$

$$|v'| = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с} - \text{кг} \cdot \text{м/с}}{\text{кг} + \text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}}{\text{кг}} = \text{м/с}, \quad v' \approx 1,7 \text{ м/с.}$$

Полученный результат означает, что после взаимодействия тележка не изменит направление своего движения, но будет катиться с меньшей скоростью.

Ответ: шар и тележка после взаимодействия будут двигаться со скоростью около 1,7 м/с.

Проанализируем полученный при решении задачи результат. Если $Mu_1 < mu_2$, то скорость совместного движения будет отрицательной. Если же $Mu_1 - mu_2 = 0$, то тележка после удара остановится.

? 1. Какая система называется замкнутой системой тел? 2. Приведите примеры, когда систему взаимодействующих тел можно считать замкнутой. 3. Какое столкновение тел считается абсолютно неупругим ударом? абсолютно упругим ударом? 4. Какова формулировка закона сохранения импульса? 5. Какова математическая запись закона сохранения импульса? 6. Каковы условия применимости закона сохранения импульса? 7. Приведите пример проявления (применения) закона сохранения импульса.  8. Назовите имя ученого, установившего закон сохранения импульса (закон сохранения количества движения).

■ 1. Два неупругих шара массой 0,5 кг и 1 кг движутся навстречу друг другу со скоростями 7 м/с и 8 м/с. Какова будет скорость шаров после столкновения? Куда будет направлена эта скорость?

2. Мальчик массой 60 кг бежит со скоростью 5 м/с за легкоподвижной тележкой массой 50 кг и вскакивает на нее. С какой скоростью станет двигаться тележка после того, как мальчик вскочит на нее? Скорость тележки до взаимодействия равна 2 м/с.

3. Вагон массой 20 т движется со скоростью 1,5 м/с и сталкивается с неподвижной платформой массой 10 т. Какова скорость платформы после срабатывания автосцепки?

4. Неподвижная лодка вместе с находящимся в ней охотником имеет массу 250 кг. Охотник выстреливает из охотничьего ружья в горизонтальном направлении. Какую скорость получит лодка после выстрела? Масса пули 8 г, а ее скорость при вылете равна 700 м/с.

§ 26. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Какое движение называется реактивным? *Реактивное движение — это движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части.*

Реактивное движение мы часто наблюдаем в повседневной жизни. Самый простой пример реактивного движения — движение воздушного шарика. Если надуть шарик и отпустить его, то он стремительно поднимется вверх. Движение будет кратковременным до тех пор, пока продолжается истечение воздуха. Если на водопроводный кран надеть резиновую трубку, то при включении воды она отклонится в сторону, противоположную струе вытекающей воды.

Для полива небольших полей используется дождевальный аппарат (рис. 195, а). Ствол этого аппарата непрерывно вращается вокруг вертикальной оси. Это достигается благодаря незначительному изгибу конца ствола в горизонтальной плоскости (рис. 195, б): струя воды, вытекая из него, создает реактивную силу, которая вращает ствол.

Реактивное движение наблюдается у осьминогов, кальмаров, каракатиц, медуз. Все они используют для плавания реакцию (отдачу) выбрасываемой струи воды.



Рис. 195. Дождевальный аппарат

* Кальмаров называют биологическими ракетами (рис. 196). В мышцах кальмара в результате сложных превращений химическая энергия переходит в механическую энергию. Кальмар засасывает воду через широко открытую мантийную щель в мантийную полость. Сила тяги, вызывающая движение животного, создается за счет выбрасывания струи воды через узкое сопло, которое расположено на брюшной поверхности кальмара. Это сопло снабжено специальным клапаном, и мышцы могут его поворачивать. Изменяя угол установки воронки, кальмар плывет одинаково хорошо вперед, назад и в сторону. Периодически выбрасывая вбираемую в себя воду, кальмар способен развивать скорость до 60–70 км/ч.

Реактивное движение совершают самолеты, боевые ракеты, космические ракеты и даже легкие плавающие танки.

Рассмотрим более подробно реактивное движение на примере ракеты. Любая ракета всегда имеет трубчатый корпус 1, закрытый с одного конца (рис. 197). На другом конце расположено сопло 2. В ракете находится запас топлива 3.

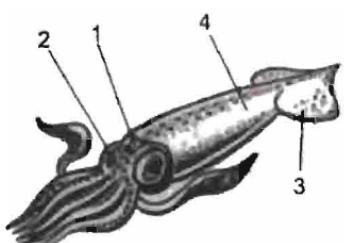


Рис. 196. Кальмар — живая ракета: 1 — воронка; 2 — голова; 3 — плавник; 4 — мантия

Когда ракета на стартовой площадке неподвижна, то ее суммарный импульс равен нулю: неподвижно топливо и неподвижен корпус. Для простоты расчетов будем считать, что топливо сгорает мгновенно и горячие газы 4 под большим давлением выбрасываются через сопло 2 наружу. При этом корпус ракеты станет двигаться в сторону, противоположную движению газов. Первые отечественные ракеты были запущены в 1933 г.

Реактивное движение — следствие закона сохранения импульса: $\sum \vec{p} = \sum \vec{p}'$.

Запишем закон сохранения импульса в проекции на координатную ось OY :

$$0 = m_k v_k - m_r v_r,$$

где m_k и v_k — масса и скорость корпуса ракеты, m_r и v_r — масса и скорость вылетающих из сопла газов.

Преобразуем уравнение: $m_r v_r = m_k v_k$.

Скорость корпуса можно рассчитать по формуле:

$$v_k = \frac{m_r v_r}{m_k}$$

Скорость ракеты можно увеличить двумя путями: *увеличив скорость вытекающих газов из сопла ракеты и увеличив массу сгораемого топлива*. Но второй путь приведет к уменьшению доли полезной массы — массы корпуса, а также перевозимого груза.

Реальная скорость ракеты будет значительно меньше рассчитанной, так как вблизи Земли заметно влияние сопротивления воздуха и топливо сгорает не мгновенно, а постепенно. При этом масса ракеты уменьшается так же постепенно. Закон движения тел переменной массы намного сложнее, чем рассмотренный нами. Расчеты для движения тела переменной массы были проведены русскими учеными И.В. Мещерским (1859—1935) и К.Э. Циолковским (1857—1935). Согласно теории Мещерского—Циолковского максимальная скорость ракеты и максимальный полезный груз, который она может доставить в заданную точку космического пространства, в основном определяются скоростью истечения газов, образующихся при сгорании топлива, и теплотой сгорания топлива.

Реактивные двигатели. Широкое применение реактивные двигатели получили в настоящее время в связи с освоением космического пространства. Используются они также в метеорологических и военных ракетах различного радиуса действия. Все современные скоростные самолеты оснащены реактивными двигателями.

В космическом пространстве использовать какие-либо другие двигатели, кроме реактивных, невозможно: нет опоры (твердой, жидкой или газообразной), отталкиваясь от которой космический корабль мог бы получить ускорение.

Реактивные двигатели делятся на два класса: ракетные и воздушно-реактивные.

В ракетных двигателях топливо и необходимый для горения окислитель находятся непосредственно внутри двигателя или в

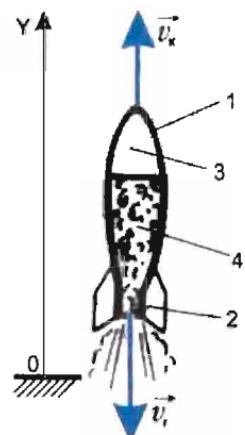


Рис. 197. Устройство ракеты: 1 — трубчатый корпус; 2 — сопло; 3 — топливо; 4 — горячие газы

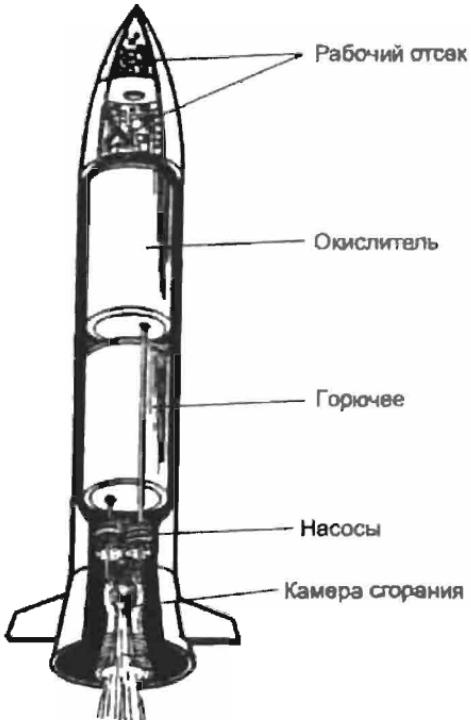


Рис. 198. Схема ракеты-носителя

его топливных баках. Различают ракетные двигатели, работающие на твердом и жидком топливе. Жидкостно-реактивные двигатели используются при запуске космических кораблей. На рисунке 198 приведена схема ракеты-носителя, работающей на жидком топливе. В жидкостно-реактивных двигателях (ЖРД) в качестве горючего можно применять керосин, бензин, спирт, анилин, жидкий водород и др., а в качестве окислителя, необходимого для горения, — жидкий кислород, азотную кислоту, жидкий фтор и др. Горючее и окислитель хранятся отдельно в специальных баках и с помощью насосов подаются в камеру, где при сгорании топлива температура может достигать до 3000°C , а давление — до 50 атм

($5 \cdot 10^6$ Па). Скорость истечения газов из сопла равна примерно 5 км/с. Для того чтобы ракета могла покинуть пределы земного притяжения, ей необходимо сообщить скорость около 11,5 км/с. Но для достижения такой скорости требуется, чтобы масса горючего была примерно в 25 раз больше, чем масса самой ракеты без горючего.

Воздушно-реактивные двигатели в настоящее время применяют главным образом в самолетах. Основное их отличие от ракетных двигателей состоит в том, что окислителем для горения топ-



Циолковский Константи́н Эдуардович (1857—1935) — русский ученый и изобретатель в области реактивных летательных аппаратов, воздухоплавания, основоположник современной космонавтики. Впервые обосновал возможность использования ракет для межпланетных сообщений. В работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами» (1903) предложил теорию полета ракеты с учетом изменения ее массы и выдвинул идею о применении ракетных двигателей для межпланетных кораблей. В 1929 г. создал теорию движения многоступенчатых (составных) ракет.

лива служит кислород воздуха, поступающий внутрь двигателя из атмосферы.

Освоение космического пространства. Автором первого в мире проекта реактивного летательного аппарата для полета людей был русский революционер-народоволец *Н.И. Кибальчич* (1853—1881).

Основы теории реактивного двигателя и научное доказательство возможности полетов в межпланетном пространстве были впервые высказаны и разработаны русским ученым К.Э. Циолковским в работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами». Ему принадлежит также идея применения многоступенчатых ракет.

Для реализации идей Циолковского необходимо было разработать конструкцию ракеты, подобрать нужное топливо и решить множество других вопросов, прежде чем можно было начать освоение космоса.

В 1932 г. под руководством *С.П. Королева* была создана группа по изучению реактивного движения (ГИРД), которой удалось разработать основы техники для космических полетов. Эта группа 17 августа 1933 г. провела первый успешный запуск жидкостной ракеты ГИРД-09. Запуск этой ракеты показал, что создание ракет для космических полетов в принципе возможно.

Практическое освоение космоса началось с 4 октября 1957 г., когда в СССР впервые в истории человечества запустили искусственный спутник Земли. Теоретические основы полета космических аппаратов были разработаны по инициативе М.К. Тихонравова под руководством М.В. Келдыша. Научно-конструкторские работы выполнялись под руководством С.П. Королева.

14 сентября 1959 г. советская станция «Луна-2» впервые в истории человечества достигла поверхности Луны.

12 апреля 1961 г. на космическом корабле «Восток» наш соотечественник *Ю.А. Гагарин* совершил первый полет в космос.

18 марта 1965 г. летчик-космонавт СССР *А.А. Леонов* осуществил первый выход в космическое пространство из кабины космического корабля «Восход-2». В настоящее время космонавты регулярно выходят в открытый космос с целью монтажа или ре-

Королев Сергей Павлович (1907—1966) — русский ученый, конструктор ракет, основоположник практической космонавтики. Под его руководством были запущены баллистические и геофизические ракеты, первый искусственный спутник Земли. Генеральный конструктор космических кораблей «Восток» и «Восход», на которых впервые совершены полет человека и выход человека в космос.





Рис. 199. Космонавт на фоне Земли

монтажа космических кораблей. На рисунке 199 приведена фотография космонавта на фоне Земли.

3 февраля 1966 г. советская автоматическая станция «Луна-9» совершила мягкую посадку на поверхность Луны и передала на Землю с помощью телевизионной системы панораму лунного ландшафта.

21 июля 1969 г. американские астронавты Н. Армстронг и Э. Олдрин вышли из кабины космического корабля и сделали первые шаги по лунной поверхности.

24 сентября 1970 г. советская автоматическая станция «Луна-16» совершила первый автоматический полет по маршруту Земля—Луна—Земля и доставила на Землю образцы лунного грунта, взятые с помощью автоматической буровой установки.

Кроме Луны, советские и американские автоматические станции изучали и другие планеты Солнечной системы: Венеру, Марс, Юпитер, Меркурий, Сатурн, а также их спутники.

Были созданы и запущены на околоземную орбиту станции-спутники «Салют», «Мир» (СССР), «Скайлэб» (США). На форзаце учебника помещена фотография орбитального комплекса (ОК) «Мир» — гордости отечественных ученых, инженеров, техников, космонавтов. Первый модуль «Мира» был запущен 20 февраля 1986 г. К станции было пристыковано несколько модулей. Модульный принцип построения ОК позволил расширить состав

научного оборудования, улучшить условия жизни и работы космонавтов на околоземной орбите. Работа ОК «Мир» на орбите была рассчитана на 5 лет, а проработал 15 лет. В 2001 г. комплекс был затоплен в Тихом океане.

Всего на ОК «Мир» работало 28 основных экспедиций, побывало 104 космонавта (42 наших соотечественника, 62 иностранных специалиста). На ОК были проведены исследования по разным направлениям: *техника* (проведено более 6700 экспериментов), *биотехнология* (получены новые знания по клеткам, белкам, вирусам), *медицина* (создана система медицинского обеспечения полетов длительностью до 1,5 лет), *материаловедение* (проведено 2450 экспериментов, получены образцы материалов, по физическим характеристикам превосходящие земные аналоги), *астрофизика* (выполнено более 6200 экспериментов, детально исследован центр Галактики), *наблюдения Земли* (проведена фотосъемка 125 млн км² земной поверхности).

Именно орбитальный комплекс «Мир» стал прообразом строящейся в настоящее время на околоземной орбите Международной космической станции (МКС).

Космические полеты и создание орбитальных станций используются как для научных исследований, так и для решения важных народнохозяйственных задач. Спутники связи через систему станций позволяют осуществлять телевизионную и телефонную связь. Метеоспутники собирают информацию о процессах, происходящих в атмосфере, а затем ее используют для прогнозирования погоды и стихийных явлений. Другие спутники служат целям навигации: помогают морским судам и самолетам определять свои координаты.

С выходом человека в космос не только открылись возможности исследования других планет Солнечной системы, но представилась возможность изучения природных ресурсов Земли. Раньше общая карта Земли составлялась как мозаичное панно; теперь снимки с орбиты, охватывающие миллионы квадратных километров, позволяют выбирать для исследования наиболее интересные участки земной поверхности. Из космоса лучше различаются крупные геологические структуры: плиты, разломы земной коры — места наиболее вероятного залегания полезных ископаемых; удалось обнаружить новый тип геологических образований — кольцевые структуры, подобные кратерам Луны и Марса.

На Земле разработаны технологии получения материалов, которые нельзя изготовить в земных условиях, а на орбитальных станциях их можно получить в состоянии длительной невесомости (например, сверхчистые монокристаллы).

? 1. Какое движение называется реактивным? 2. Приведите примеры реактивного движения. 3. Какой закон используется для расчета скорости корюса ракеты? 4. Какие ракетные двигатели применяются при запуске ко-

смических кораблей? 5. Кто был автором первого в мире проекта реактивного летательного аппарата для людей? 6. Кто первым разработал теорию реактивного двигателя и высказал научные доказательства возможности полетов в межпланетном пространстве? 7. Когда началось практическое освоение космоса? 8. Кто первым и когда совершил полет в космос? 9. Кто первым и когда осуществил выход в космическое пространство? 10. Кем и когда были сделаны первые шаги по Луне? 11. С какой целью совершаются космические полеты и создаются орбитальные станции?

§ 27. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

Обычно считают всякий полезный труд работой. Работой называете выполнение учебных заданий, чтение трудных для понимания книг. Если вы будете длительное время держать портфель в руках, то скажете, что это утомительная работа.

Понятие работы в физике несколько иное. В механике понятие работы появилось лишь в XIX в., когда человек стал использовать машины и механизмы.

Работа силы. Прежде чем ввести определение работы, приведем примеры совершения механической работы.

Пример 1. Электровоз с некоторой силой тянет вагоны, при этом состав перемещается на какое-то расстояние.

Пример 2. Подъемный кран поднимает бетонную плиту на пятый этаж строящегося дома.

Пример 3. Маленький катерок перемещает по акватории порта океанский лайнер.

Пример 4. При выстреле из охотничьего ружья сила давления пороховых газов перемещает пулю вдоль ствола.

Пример 5. При вспахивании почвы трактор тянет плуг с некоторой силой.

Что общего в этих примерах? Во всех случаях совершается работа под действием приложенной к телу силы.

Механической работой, или просто работой, называется величина, равная произведению модуля силы, модуля перемещения и косинуса угла между векторами силы и перемещения.

Математически это записывается так:



$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\alpha,$$

где A — механическая работа; \vec{F} — постоянная сила, действующая на тело; \vec{s} — перемещение тела; α — угол между векторами силы и перемещения.

В математике такое произведение принято называть скалярным произведением.

Работа — скалярная величина; она может быть как положительной, так и отрицательной величиной.

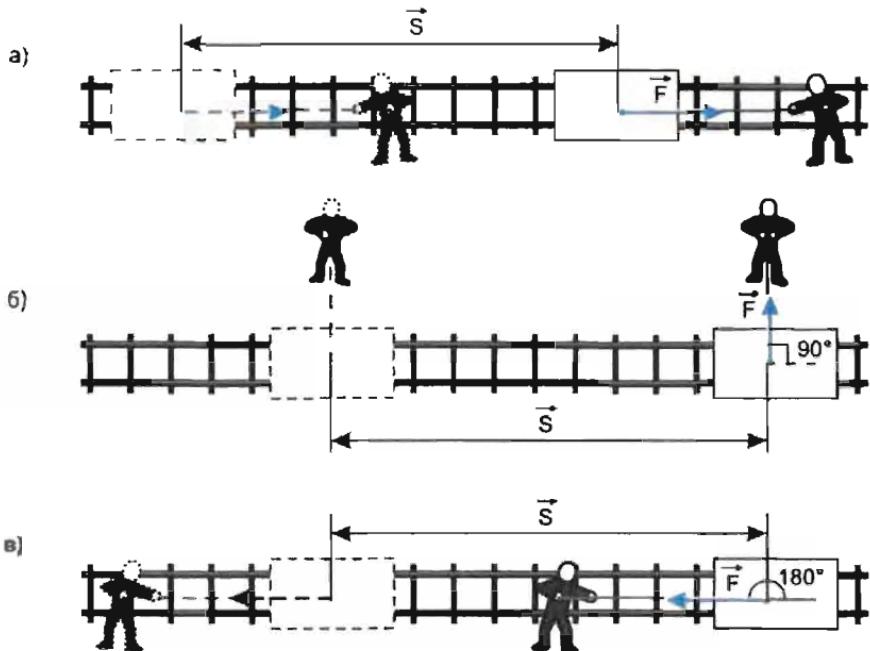


Рис. 200

Единица работы в СИ [A] = Н·м = Дж (джоуль); названа в честь английского ученого Джеймса Джоуля (1818–1889).

1 Дж – это работа, совершаемая постоянной силой в 1 Н при перемещении тела на 1 м, если направления силы и перемещения совпадают.

Проанализируем записанную формулу. Представим, что мальчик тянет за веревку легкую тележку, поставленную на рельсы (рис. 200). Рассмотрим несколько случаев.

1. Направление силы тяги совпадает с направлением перемещения (рис. 200, а). Угол $\alpha = 0^\circ$, $\cos 0^\circ = 1$, и формула расчета имеет вид $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}|$, или $A = F \cdot s$. Если направление силы совпадает с направлением перемещения, то работа – положительная величина ($A > 0$).

2. Тележка движется по рельсам и совершает перемещение \vec{s} . Мальчик начинает тянуть за веревку в направлении, перпендикулярном движению тележки (рис. 200, б). Угол $\alpha = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$ и $A = 0$. Это значит, что если сила перпендикулярна перемещению тела, то она не совершает работу.

3. Мальчик тянет за веревку, но тележка перемещается против действия силы тяги (рис. 200, в). В этом случае угол $\alpha = 180^\circ$, $\cos 180^\circ = -1$, $A = -|\vec{F}| \cdot |\vec{s}|$, или $A = -F \cdot s$. Если сила противоположна направлению перемещения тела, то работа – отрицательная величина ($A < 0$).

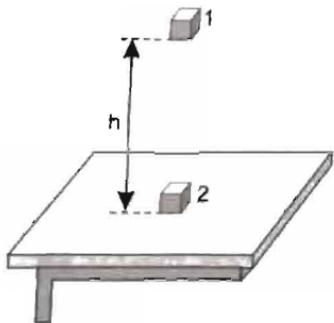


Рис. 201.

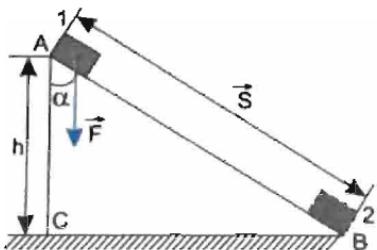


Рис. 202

4. Если мальчик не будет прикладывать силу, то тележка будет двигаться по инерции. В этом случае работу не будет совершаться ($A = 0$).

5. Мальчик может приложить такую по модулю силу, что тележка не будет перемещаться и тогда $A = 0$.

Работа силы тяжести. Предположим, что брусков массой m свободно падают с высоты h над поверхностью стола (рис. 201). В этом случае работу совершают сила тяжести и $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\alpha$. Но $\alpha = 0^\circ$ и $A = F \cdot h$ или $A_{12} = mgh$ ($A_{12} > 0$).

Изменим ситуацию. Заставим этот же брусков двигаться без трения по поверхности, изображенной на рисунке 202. Она называется наклонной плоскостью: AC — высота наклонной плоскости h , AB — длина наклонной плоскости, α — угол между длиной и высотой наклонной плоскости.

При перемещении из положения 1 в положение 2 брусков совершают перемещение, равное длине наклонной плоскости. Расчитаем работу силы тяжести: $A_{12} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\alpha$. Из треугольника CAB выразим $|\vec{s}| \cdot \cos\alpha = h$.

Значит, $A_{12} = mgh$ ($A_{12} > 0$).

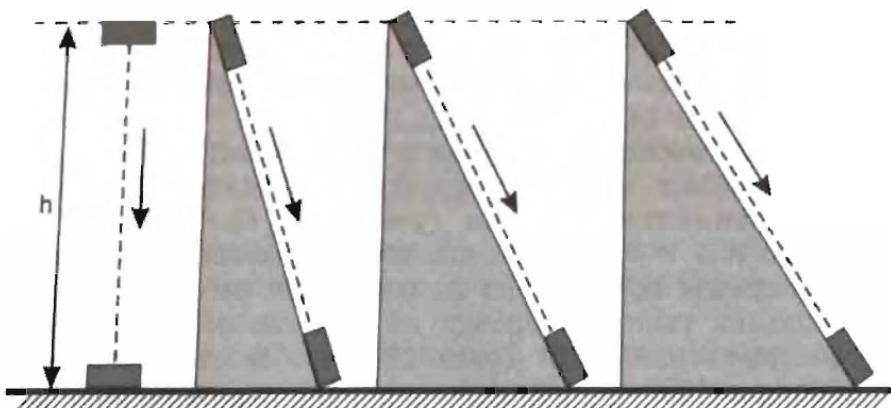


Рис. 203

Мы получили для работы силы тяжести то же самое значение. Отсюда мы можем сделать вывод, что работа силы тяжести не зависит от того, движется ли тело по вертикали или проходит более длинный путь вдоль наклонной плоскости.

Меняя угол наклона наклонной плоскости (рис. 203), мы получим один и тот же результат: при движении бруска с одной и той же высоты работа силы тяжести одинакова ($A = mgh$).

Рассмотрим более сложный случай. Допустим, что бруск сначала скользит вдоль наклонной плоскости из положения 1 в положение 2, а затем его перемещают также без трения по горизонтали из положения 2 в положение 3 (рис. 204).

В этом случае работа силы тяжести равна сумме работ на участке 1—2 и на участке 2—3:

$$A_{123} = A_{12} + A_{23}.$$

Работа силы тяжести на участке 1—2 равна $A_{12} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\alpha$. Но $|\vec{s}| \cdot \cos\alpha = h$, поэтому $A_{12} = mgh$. Работа силы тяжести на участке 2—3 равна нулю, так как угол между перемещением тела и направлением силы тяжести равен 90° . Таким образом, работа силы тяжести на участке 1—2—3 равна $A_{123} = mgh$.

?? Полученный результат показывает, что *работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положениями тела*.

Примеры решения задач

Задача 1. Парусная лодка движется под действием ветра (рис. 205, а). На парус действует сила, равная 200 Н. Угол между направлением переме-

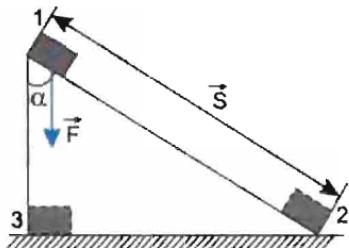


Рис. 204

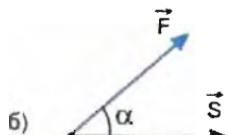
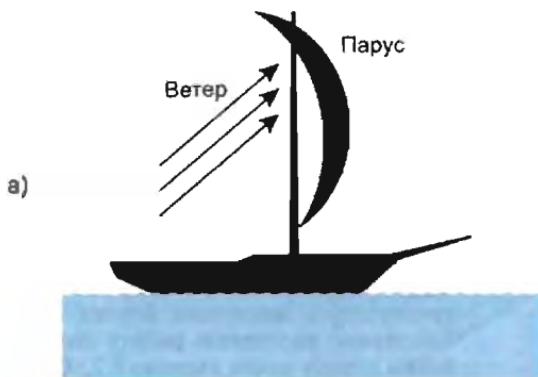


Рис. 205

щения лодки и действием силы равен 60° . Чему равна работа этой силы при перемещении лодки на расстояние, равное 300 м?

A—?

$$\begin{aligned} F &= 200 \text{ Н} \\ s &= 300 \text{ м} \\ \alpha &= 60^\circ \end{aligned}$$

Решение

$$\begin{aligned} A &= |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\alpha. \\ [A] &= \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}, \\ A &= 200 \cdot 300 \cdot 0,87 \approx 52\ 200 \text{ (Дж)} \approx 52,2 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Ответ: при перемещении лодки совершается работа, равная 52,2 кДж.

Задача 2. На рисунке 206, а изображено движение футбольного мяча массой 400 г из положения 1 в положение 3. Чему равна механическая работа при перемещении мяча из положения 1 в положение 2? Чему равна механическая работа при перемещении мяча из положения 2 в положение 3? Чему равна механическая работа при перемещении мяча из положения 1 в положение 3?

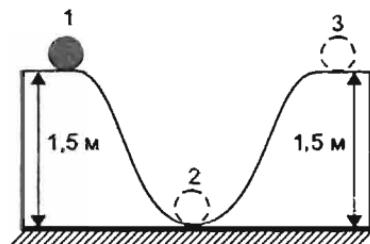
$$A_{12} — ? \quad A_{23} — ? \quad A_{1,2,3} — ?$$

$$\begin{aligned} m &= 400 \text{ г} = 0,4 \text{ кг} \\ h &= 1,5 \text{ м} \\ g &\approx 10 \text{ м/с}^2 \end{aligned}$$

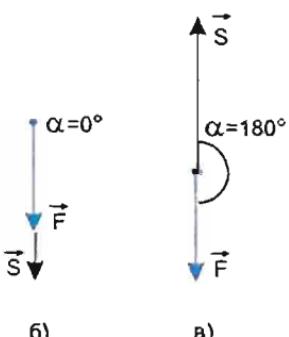
Решение

$$\begin{aligned} A_{12} &= |\vec{F}| \cdot |\vec{s}|. \\ A_{12} &= mgh, A_{12} > 0 \text{ (рис. 206, б),} \\ A_{12} &= 0,4 \cdot 10 \cdot 1,5 = 6 \text{ (Дж);} \\ A_{23} &= -F \cdot h, \\ A_{23} &= -mgh, A_{23} < 0 \text{ (рис. 206, в),} \\ A_{23} &= -6 \text{ Дж;} \\ A_{123} &= A_{12} + A_{23}, \\ A_{123} &= 0. \end{aligned}$$

Ответ: $A_{12} = 6 \text{ Дж}$, $A_{23} = -6 \text{ Дж}$, $A_{123} = 0$.



a)



- ? 1. Дайте определение механической работы. Какая это величина — векторная или скалярная? 2. Запишите формулу расчета работы. Поясните величины, входящие в эту формулу. 3. Какова единица работы в СИ? 4. В каком случае совершается механическая работа? 5. Искусственный спутник движется по круговой орбите вокруг Земли. Какая сила действует на спутник? Чему равна работа этой силы? 6. Толкнув брускок (книгу), вы замечаете, что через короткое время тело останавливается. Какая сила препятствует движению бруска (книги)? Как можно рассчитать работу этой силы? Каков смысл знака «минус»? 7. Стакан с водой стоит на столе. Чему равна работа силы тяжести? силы реакции опоры?

Рис. 206

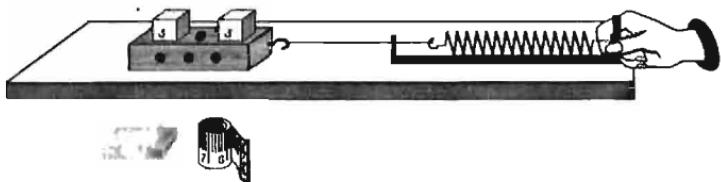


Рис. 207. Измерение работы силы, совпадающей с направлением перемещения тела

◆ Измерение механической работы

Приборы и материалы: динамометр, лента измерительная, трибометр (деревянная линейка), деревянный брускок, набор грузов по механике, угольник ученический, кусочек мела.

1. Расположите приборы так, как показано на рисунке 207. Отметьте кусочком мела положение бруска.

2. Потяните за динамометр и заставьте брускок двигаться равномерно. Снимите показание динамометра и запишите значение силы в таблицу с учетом инструментальной погрешности прибора.

3. Отметьте кусочком мела второе положение бруска. Запишите в таблицу перемещение, совершенное бруском, с учетом инструментальной погрешности линейки.

4. Рассчитайте работу силы тяги и запишите ее значение в таблицу.

* 5. Расположите динамометр под углом 30° к трибометру (рис. 208). Угол наклона действующей силы измерьте с помощью угольника. Измерив силу тяги и перемещение, совершенное бруском, рассчитайте работу силы тяги. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| № опыта | $F_{\text{тяги}}, \text{Н}$ | $s, \text{м}$ | α | $A, \text{Дж}$ |
|---------|-----------------------------|---------------|------------|----------------|
| 1 | | | 0° | |
| 2 | | | 30° | |

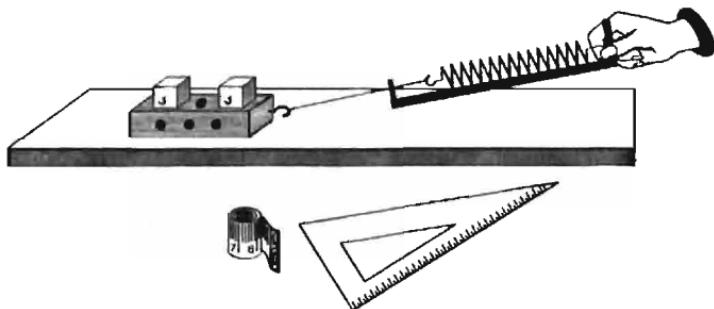


Рис. 208. Измерение работы силы, действующей под углом к направлению перемещения тела

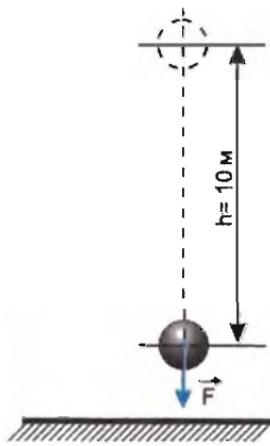


Рис. 209

Запишите соотношения между единицами работы:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ кДж} = ? \text{ Дж}; & 1 \text{ мДж} = ? \text{ Дж}; \\ 1 \text{ МДж} = ? \text{ Дж}; & 20 \text{ кДж} = ? \text{ Дж}; \\ 75 \text{ МДж} = ? \text{ Дж}; & 35 \text{ ГДж} = ? \text{ Дж}. \\ 20 \text{ гДж} = ? \text{ Дж}; & \end{array}$$

1. Рабочий передвигает тележку с песком, прикладывая силу в 100 Н. Какую работу совершил рабочий, если переместит тележку на 20 м?

2. Девочка уронила с пятого этажа мячик для настольного тенниса массой 2,5 г. Чему равна работа силы тяжести при перемещении мячика между пятым и первым этажами (рис. 209)?

3. Подъемный кран равномерно поднимает груз массой 1,5 т на высоту 15 м. Рассчитайте работу, которую совершает подъемный кран.

4. Тело массой 20 кг свободно падает в течение 6 с. Рассчитайте работу силы тяжести.

* 5. При подъеме бетонной плиты объемом 1,2 м³ была совершена работа, равная 300 кДж. Рассчитайте высоту, на которую подняли бетонную плиту. Средняя плотность бетона равна 2000 кг/м³.

§ 28. МОЩНОСТЬ

Для совершения механической работы человек широко использует различные механизмы или устройства, которые многократно усиливают его физические возможности. Так, мотоцикл, автомобиль, электропоезд или самолет позволяют нам двигаться с большими скоростями. Подъемный кран поднимает груз в десятки и сотни раз более тяжелый, чем может поднять штангист.

Одну и ту же работу разные механизмы, машины или устройства могут выполнить за различное время: одни — быстрее, другие — медленнее. На практике далеко не безразлично, быстро или медленно совершается работа. Для характеристики быстроты совершения работы введена специальная величина — мощность.

Мощность. Величина, равная отношению совершенной работы ко времени, в течение которого она совершена, называется мощностью.

Мощность будем обозначать буквой латинского алфавита N (читается «эн»). Из определения мощности получаем расчетную формулу

$$N = A/t,$$

где N — мощность механизма, машины или устройства; A — совершенная работа; t — время, в течение которого совершается работа.

Так как работа и время — скалярные величины, то и мощность — скалярная величина.

Единица мощности в СИ [N] = Дж/с = Вт (ватт). Так единица мощности названа в честь шотландского изобретателя, создателя универсального парового двигателя **Джеймса Уатта**.

1 ватт равен мощности, при которой за время 1 с совершается работа в 1 Дж.

* Действие машин стало характеризоваться мощностью со времен Д. Уатта (1736—1819). До сих пор в инженерных кругах применяется введенная им единица мощности — лошадиная сила (л. с.). 1 л. с. определяется средней работой за одну секунду, которую могла совершить сильная английская ломовая лошадь, равномерно работающая целый день: 1 л. с. \approx 736 Вт.

Мощности, развиваемые двигателями, колеблются в огромном диапазоне значений: от долей ватта до сотен и тысяч мегаватт. Мощность указывается в паспорте технического устройства. Мощности некоторых машин и установок приведены в таблице 12.

Таблица 12

Мощности тепловых двигателей некоторых машин и установок

| Машина и установка | Мощность, кВт | Машина и установка | Мощность, кВт |
|----------------------|---------------|---------------------------|-------------------|
| Веломотор | 0,7 | Трактор | 220 |
| Мотоцикл «Ява-350» | 14,7 | Самосвал | 367,7 |
| Лодочный мотор | 22 | Танк | 570 |
| Автомобиль «Москвич» | 55,2 | Теплоход «Ракета» | 880 |
| Автобус «РАФ» | 70 | Самолет «Ан-24» | 3750 |
| Автомобиль «ГАЗ» | 88 | Паровая турбина | 1 200 000 |
| Комбайн «Нива» | 103 | Атомный реактор | 4 800 000 |
| Автомобиль «ЗИЛ» | 231,8 | Ракета-носитель «Энергия» | $12,5 \cdot 10^7$ |

* Мощность, развиваемая взрослым человеком, равна при обычной ходьбе по ровной дороге 60—65 Вт, при быстрой ходь-

бе 200 Вт, при езде на велосипеде со скоростью 10 км/ч 40 Вт. Мощность, развиваемая человеком при отдельных движениях (прыжок с места, рывок при поднятии тяжести), может достигать от 1,5 до 3,3 кВт.

Средняя мощность, развиваемая сердцем человека, равна 2,2 Вт.

Мощность удара меч-рыбы может быть равной 10^5 – 10^6 Вт.

Мощность муhi в полете составляет 10^{-5} Вт.

Мощность при равномерном движении. Автомобили, самолеты, корабли, ракеты и другие транспортные средства часто движутся с постоянной скоростью. Это значит, что силы, действующие на них, благодаря работе двигателя равны по числовому значению и противоположны по направлению силам сопротивления.

Вы знаете, что если тело движется равномерно, то скорость не меняется ($v = \text{const}$). Так как $N = A/t$ и $A = F_s$, то $N = (F_s)/t$. Поскольку $s/t = \text{const}$ и $s/t = v$, то



$$N = Fv.$$

Этой формулой удобно пользоваться для вычисления мощности, когда известны действующая сила и скорость движения тела.

Из полученной формулы следует, что при постоянной мощности двигателя изменением скорости можно изменить силу тяги. Это широко используется в современных транспортных средствах. Например, в автомобиле имеется коробка передач. При подъеме в гору, когда нужна наибольшая сила тяги, водитель автомобиля переключает коробку передач на малую скорость, а при движении по горизонтальной дороге — на большую скорость.

? 1. Дайте определение мощности. 2. Запишите формулу расчета мощности. Поясните величины, входящие в эту формулу. 3. Какова единица мощности в СИ? 4. Что означает утверждение: «Мощность тепловых двигателей ракеты-носителя «Энергия» равна $12,5 \cdot 10^7$ Вт»?

● 1. Запишите соотношения между единицами мощности:

$$\begin{array}{lll} 1 \text{ кВт} = ? \text{ Вт}; & 1 \text{ мВт} = ? \text{ Вт}; & 1 \text{ МВт} = ? \text{ Вт}; \\ 15 \text{ кВт} = ? \text{ Вт}; & 250 \text{ МВт} = ? \text{ Вт}; & * 31 \text{ л. с.} = ? \text{ Вт}; \\ * 1200 \text{ л. с.} = ? \text{ Вт}. \end{array}$$

2. Однаковая ли сила тяги двигателей автомобилей «Москвич», «ГАЗ», «ЗИЛ» при скорости движения 70 км/ч? Дополнительные данные вы можете найти в таблице 12.

3. Можно ли сравнить следующие значения физических величин? Если можно, то укажите, какая из них больше и во сколько раз. Ответ обоснуйте.

- 1) 15 Дж и 15 Вт.
2) 800 кг/м³ и 800 Вт.
3) 70 Дж/с и 2 Вт.
4) 55 л. с. и 40 480 Вт.
5) 250 Н и 25 кВт.

■ 1. Садовод поднимает из колодца вверх ведро воды, совершая работу 2,4 кДж. Какую среднюю мощность развивает он за 20 с?

2. Подвесной лодочный мотор развивает мощность 22 кВт. Какую работу может совершить мотор при перевозке груза за 30 мин?

3. Груз массой 3 т поднимают на высоту 12 м. Мощность двигателя погрузочной машины 4 кВт. За какое время будет поднят груз? Время выражите в секундах и минутах.

4. Электровоз движется со скоростью 90 км/ч, развивая силу тяги 2200 Н. Какова мощность двигателя электровоза?

* 5. Чему равна сила тяги двигателя автомобиля «ЗИЛ» при скорости движения 72 км/ч? Необходимые дополнительные данные вы найдете в таблице 12.

§ 29. ЭНЕРГИЯ ТЕЛА

С понятием работы тесно связано другое понятие — энергия. Если тело или несколько взаимодействующих между собой тел могут совершить работу, то говорят, что они обладают энергией (от греч. *enέrgēia* — действие, деятельность). Поскольку в механике изучается движение тел и взаимодействие тел между собой, то принято различать два вида механической энергии: кинетическую и потенциальную.

* Впервые понятие энергии использовал древнегреческий философ и ученый Аристотель как обозначение некоего деятельного начала. Первый шаг к широкому использованию термина «энергия» в физике сделал английский ученый Т. Юнг.

Работа силы и кинетическая энергия. Предположим, что брусков движется равномерно и прямолинейно со скоростью \bar{v}_0 (рис. 210). В некоторой точке траектории на тело начинает действовать постоянная сила \bar{F} . Направление силы совпадает с направлением движения тела и действует до тех пор, пока тело совершает перемещение \bar{s} . Рассчитаем работу силы \bar{F} .

Используя формулу расчета работы $A = |\bar{F}| \cdot |\bar{s}| \cdot \cos\alpha$ и учитывая, что направления силы и перемещения совпадают (т. е. $\alpha = 0$), рассчитаем работу силы:

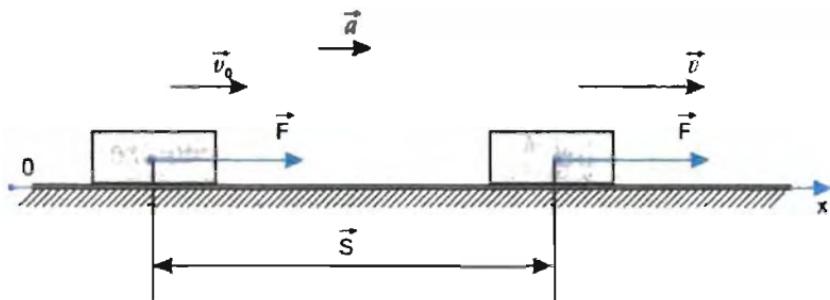


Рис. 210

$$A = F \cdot s. \quad (1)$$

На основании второго закона Ньютона выразим силу:

$$F = m a. \quad (2)$$

Но $\vec{a} = (\vec{v} - \vec{v}_0)/t$, и в проекции на координатную ось OX получаем:

$$a = (v - v_0)/t. \quad (3)$$

$$(3) \Rightarrow (2)$$

$$F = m(v - v_0)/t. \quad (4)$$

Выразим перемещение и среднюю скорость v_{cp} ($s = v_{cp}t$):

$$v_{cp} = (v + v_0)/2, \quad s = (v + v_0)t/2. \quad (5)$$

$$(4) \text{ и } (5) \Rightarrow (1)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{m(v - v_0)}{t} \cdot \frac{(v + v_0)}{2} t = \frac{m}{2} (v^2 - v_0^2), \\ A &= \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

В правой части уравнения (6)

$mv^2/2$ характеризует конечное состояние системы;
 $mv_0^2/2$ характеризует начальное состояние системы.

Величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости, называется кинетической энергией тела (от греч. *kinētikos* — способный двигаться).

Обозначим кинетическую энергию тела буквой E_k . Кинетическая энергия — скалярная величина; единица в СИ [E_k] = $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$ (дюйль).

Если обозначить начальную кинетическую энергию через $E_{k0} = mv_0^2/2$, а конечную — $E_k = mv^2/2$, то формулу можно записать в виде:

$$A = E_k - E_{k0}, \text{ или}$$

$$A = \Delta E_k.$$

Изменение кинетической энергии тела равно работе сил, действующих на тело.

Приведенная выше формулировка и математическая запись называется теоремой о кинетической энергии.

Пример решения задачи

Конькобежец массой 70 кг двигался по льду с постоянной скоростью 10 м/с. В некоторый момент времени он попал на участок льда, посыпанный песком. Проехав во этому участку 10 м, он остановился. Чему равна сила трения, действующая на конькобежца?

| $F_{\text{тр}} - ?$ | <i>Решение</i> |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m = 70 \text{ кг}$ | $A = \Delta E_k,$ (1) |
| $v_0 = 10 \text{ м/с}$ | $A = \vec{F} \cdot \vec{s} \cdot \cos \alpha,$ |
| $v = 0$ | $A = - F_{\text{тр}} s,$ (2) |
| $s = 10 \text{ м}$ | $\Delta E = E_k - E_{k0} \Rightarrow \Delta E = - E_{k0}.$ (3) |
| | $(2) \text{ и } (3) \Rightarrow (1)$ |
| | $- F_{\text{тр}} \cdot s = - E_{k0},$ |
| | $F_{\text{тр}} \cdot s = m v_0^2 / 2 \Rightarrow F_{\text{тр}} = m v_0^2 / 2s.$ |
| | $[F_{\text{тр}}] = \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 \cdot \text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = \text{Н},$ |
| | $F_{\text{тр}} = 70 \cdot 100 / 20 = 350 \text{ (Н)}.$ |

Ответ: сила трения, действующая на конькобежца, равна 350 Н.

Потенциальная энергия — энергия, обусловленная взаимодействием тел (от лат. *potentia* — сила). Потенциальная энергия (обозначается буквой E_p) характеризует не любое взаимодействие тел, а лишь такое, которое описывается силами, не зависящими от скорости. Большинство сил (сила тяжести, сила упругости и др.) именно такие; исключение составляет сила трения. Мы уже ознакомились с работой силы тяжести и убедились, что *работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положениями тела; работа по замкнутой траектории равна нулю* (см. § 27).

Силы, которые не зависят от скорости и работа которых по любой замкнутой траектории равна нулю, называются потенциальными силами.

Для описания взаимодействия тел посредством потенциальных сил выбирается какое-либо положение тела, при котором его потенциальная энергия равна нулю — нулевой уровень потенциальной энергии.

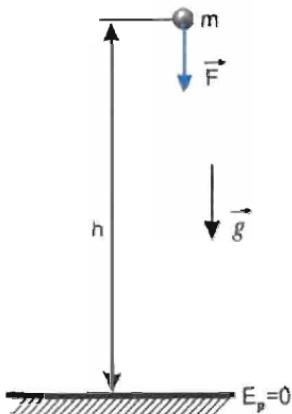


Рис. 211

Сила тяжести, сила упругости — потенциальные силы. В 8 классе мы рассмотрим потенциальную энергию тела, на которое действует сила тяжести.

Допустим, что тело массой m находится на высоте h от поверхности Земли (т. е. рассмотрим систему взаимодействующих тел Земля—тело) (рис. 211). За нулевой уровень потенциальной энергии выберем поверхность Земли.

Потенциальная энергия тела, находящегося на высоте h от этой поверхности, равна работе, совершаемой силой при перемещении его из данной точки на поверхность Земли: $E_p = A$.

Под действием силы тяжести тело свободно падает. Работа силы тяжести $A = mgh$. Значит,

$$E_p = mgh.$$

В этой формуле высота h отсчитывается от нулевого уровня потенциальной энергии. Если нулевой уровень выбрать не на поверхности Земли, то высота изменится, а вместе с ней изменится потенциальная энергия тела. Таким образом, *потенциальная энергия зависит от выбора нулевого уровня и характеризуется положением (координатой) тела*.

Другое отличие потенциальной энергии от кинетической энергии: при совершении положительной работы потенциальная энергия уменьшается, а не увеличивается. В нашем примере (см. рис. 211) на высоте h тело обладало потенциальной энергией $E_p = mgh$, а на поверхности Земли ее энергия становится равной нулю. При подъеме тела потенциальная энергия возрастает.

Потенциальная энергия E_p — скалярная величина; единица в СИ $[E_p] = \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2\cdot\text{м} = \text{Н}\cdot\text{м} = \text{Дж}$.

* Понятие потенциальной энергии введено в физику в 1847 г. немецким ученым Германом Гельмгольцем. Сам он называл ее «количеством напряженных сил». Термин «потенциальная Энергия» ввел в 1853 г. шотландский ученый Уильям Ранкин.

? 1. В каком случае говорят, что тело обладает энергией? 2. Какие виды механической энергии вам известны? 3. Дайте определение кинетической энергии. 4. Запишите формулу расчета кинетической энергии. Поясните величины, входящие в эту формулу. 5. Сформулируйте теорему о кинетической энергии, запишите ее математически. 6. Какая энергия считается

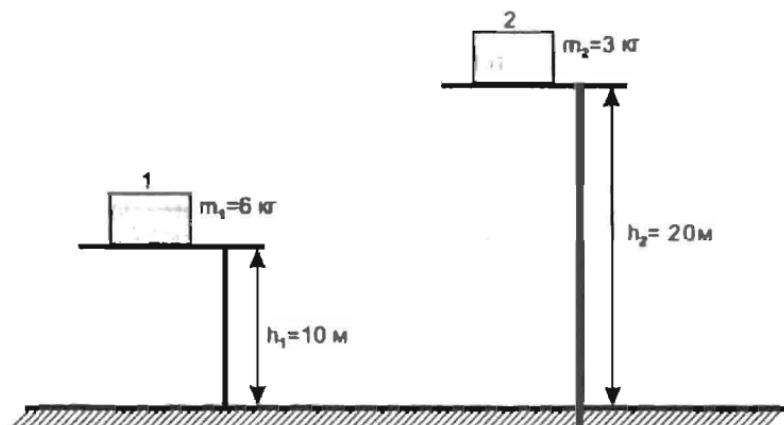


Рис. 212

потенциальной энергией? 7. Как можно рассчитать потенциальную энергию тела, на которое действует сила тяжести? 8. В чем различие потенциальной энергии и кинетической энергии?

- 1. Что можно сказать о потенциальной энергии двух тел относительно поверхности Земли (рис. 212)?
- * 2. На рисунке 213 показаны положения пяти тел с различными массами на разных расстояниях от поверхности Земли. Что можно сказать о потенциальной энергии этих тел? Ответ обоснуйте.

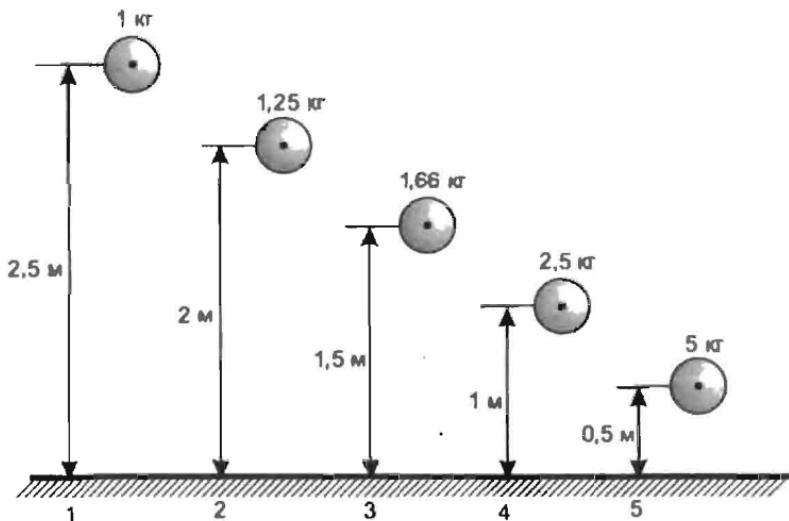


Рис. 213

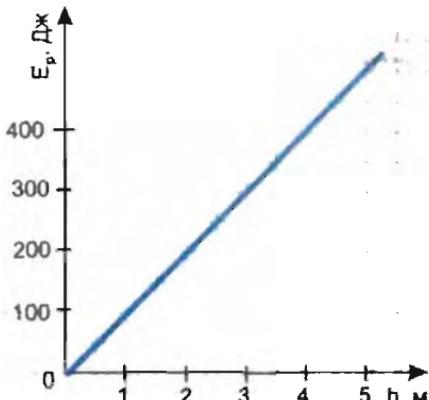


Рис. 214

3. Представленный на рисунке 214 график отражает зависимость потенциальной энергии тела от высоты: $E = E(h)$. Чему равна масса тела?
4. Нагруженные сани массой 20 кг покоятся. Затем санки стали тянуть за веревку, при этом была совершена работа, равная 250 Дж. Какую скорость приобрели сани?

§ 30. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В холодную погоду, чтобы согреть руки, мы быстро трём одну ладонь о другую и тем самым согреваем их. При резком торможении автомобиля в результате трения колес об асфальт покрышки колес нагреваются. Металлическая деталь и резец токарного станка нагреваются так сильно, что для охлаждения к месту резания подают специальную жидкость (эмulsionю). Приведенные примеры позволяют сделать вывод, что механическая энергия преобразуется во внутреннюю.

Многочисленные эксперименты показали, что превращенная часть механической энергии равна увеличению внутренней энергии, а полная энергия замкнутой, или изолированной, системы остается постоянной. Это и есть закон превращения и сохранения энергии.

Полная энергия замкнутой, или изолированной, системы остается постоянной при всех изменениях, происходящих внутри этой системы:

$$E = \text{const.}$$

Закон сохранения и превращения энергии является фундаментальным законом природы.

3. Масса трактора 6 т, а легкового автомобиля 1,5 т. Скорости тел одинаковые. Какое из тел обладает большей кинетической энергией? Ответ обоснуйте.

■ 1. Начальная скорость пули при вылете из автомата Калашникова равна 715 м/с. Масса пули 7,9 г. Какой кинетической энергией обладает пуля при вылете?

2. Мальчик подбросил футбольный мяч массой 0,4 кг с поверхности земли на высоту 3 м. Какой потенциальной энергией будет обладать мяч на этой высоте?

3. Представленный на рисунке 214 график отражает зависимость потенциальной энергии тела от высоты: $E = E(h)$. Чему равна масса тела?

4. Нагруженные сани массой 20 кг покоятся. Затем санки стали тянуть за веревку, при этом была совершена работа, равная 250 Дж. Какую скорость приобрели сани?

Рассмотрим превращения энергии в механической системе на примере свободного падения тела. Систему тел Земля—тело можно считать замкнутой, если сопротивлением о воздух пренебречь.

Допустим, шарик массой m находится на высоте h , от поверхности Земли (рис. 215). Под действием силы тяжести шарик будет свободно падать и через некоторое время достигнет поверхности. Поверхность Земли будем считать нулевым уровнем потенциальной энергии. Рассмотрим, чему равна полная механическая энергия в трех положениях шарика: 1, 2 и 3.

$$\text{Положение 1: } E_1 = E_p, \quad E_1 = mgh_1. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Положение 2: } E_2 &= E_{p2} + E_{k2}, \\ E_{p2} &= mgh_2, \quad E_{k2} = mv_2^2/2, \\ E_2 &= mgh_2 + mv_2^2/2. \end{aligned}$$

Выразим v_2^2 . Так как $v^2 - v_0^2 = 2\vec{a}\vec{s}$, то $v_2^2 = 2gs$;
 $E_2 = mgh_2 + m/2 \cdot 2gs \Rightarrow E_2 = mgh_2 + mgs \Rightarrow E_2 = mg(h_2 + s)$.

Из рисунка 215 видно, что $h_2 + s = h_1$. Значит, $E_2 = mgh_1$. (2)

$$\text{Положение 3: } E_3 = E_{k3}; \quad E_{p3} = 0.$$

$$E_{k3} = mv^2/2.$$

$$\text{Так как } v^2 = 2gh_1, \text{ то } E_3 = m/2 \cdot 2gh_1 \Rightarrow E_3 = mgh_1. \quad (3)$$

Сравнивая правые части уравнений (1), (2) и (3), получаем, что полная механическая энергия во всех трех положениях одинаковая: $E = \text{const}$.

Полная механическая энергия замкнутой, или изолированной системы при всех изменениях в системе сохраняется:

$$E = E_p + E_k = \text{const.}$$

Закон сохранения механической энергии является частным случаем всеобщего закона превращения и сохранения энергии.

Энергия не создается и не уничтожается, а только превращается из одного вида в другой.

В работе «О сохранении силы» Герман Гельмгольц впервые сформулировал и обосновал закон сохранения энергии, отметив его всеобщий характер. Основные свои идеи учёный доложил на заседании Физического общества в 1847 г. Называя кинетичес-

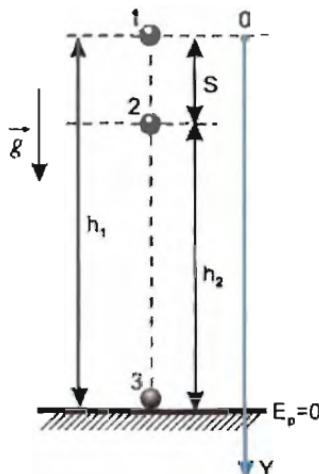


Рис. 215

Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821—1894) — немецкий естествоиспытатель. Автор фундаментальных трудов по физике, биофизике, физиологии, психологии, философии. Провел исследования по электродинамике, оптике, молекулярной физике, акустике, гидродинамике. В работе «О сохранении силы» (1847) сформулировал и обосновал закон сохранения энергии, отметив его всеобщий характер. Сумел связать воедино результаты многих исследований, относящихся к разным разделам физики: в акустике предложил теорию слуха, построил модель уха; в гидродинамике объяснил ряд метеорологических явлений и механизм образования морских волн. В 1881 г. выдвинул идею атомарного строения электричества.



кую энергию «живой силой», а потенциальную — «напряженной силой», Гельмгольц доказывает, что «когда тела природы действуют друг на друга с силами притяжения или отталкивания, независимыми от времени и скорости, то сумма живых и напряженных сил остается постоянной». Так был впервые сформулирован один из самых фундаментальных законов природы — закон сохранения энергии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Приборы и материалы: шарик, желоб лабораторный, штатив, часы-секундомер, цилиндр металлический, лента измерительная, весы рычажные с набором гирь.

- ◆ 1. Соберите установку, изображенную на рисунке 216.
- 2. Определите массу шарика с помощью рычажных весов и набора гирь. Значение запишите в таблицу.
- 3. Измерьте высоту h начального положения шарика относительно поверхности стола. Запишите результаты измерения в таблицу.

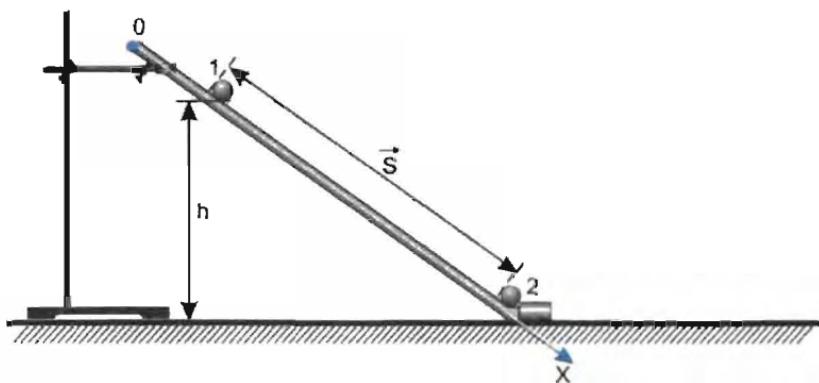


Рис. 216

4. Так как шарик движется из состояния покоя равноуско²ренно, то $v = a \cdot t$ и $s = at^2/2 \Rightarrow a = 2s/t^2$.

Получим формулу расчета скорости шарика в момент столкновения с цилиндром: $v = 2s/t$.

Результаты измерений времени движения t , пройденного пути s и вычислений скорости шарика запишите в таблицу.

5. Рассчитайте потенциальную энергию шарика в положении 1 ($E_p = mgh$) и кинетическую энергию шарика в положении 2 ($E_k = mv^2/2$). Запишите результаты вычислений в таблицу.

6. Сравните значения энергии в положениях 1 и 2.

Результаты измерений и вычислений

| № опыта | $m, \text{ кг}$ | $h, \text{ м}$ | $s, \text{ м}$ | $t, \text{ с}$ | $v, \text{ м/с}$ | $E_p, \text{ Дж}$ | $E_k, \text{ Дж}$ |
|---------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | | | | | | |

Пример решения задачи

Брускок массой 0,04 кг скользит с высоты 1 м по рельсам, образующим круговую петлю радиусом 25 см, и останавливается в положении 7. При движении из положения 1 в положение 6 трением преябре^{ть} (рис. 217). 1) Чему равна работа, совершенная силой тяжести, при перемещении по дуге петли из положения 3 в положение 4? Ответ обоснуйте. 2) Чему равна работа, совершенная силой тяжести, при перемещении по дуге петли из положения 4 в положение 5? Ответ обоснуйте. 3) Чему равна работа, совершенная силой тяжести, при перемещении по дуге петли из положения 3 в положение 5? Ответ обоснуйте. 4) Чему равна работа силы трения на горизонтальном участке рельс при перемещении бруска из положения 6 в положение 7, если расстояние между ними 3 м? Коэффициент трения скольжения 0,03.

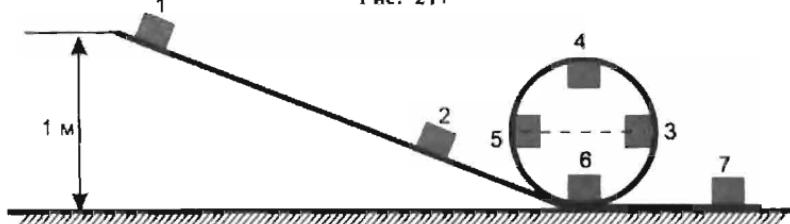
$$A_{34} = ? \quad A_{45} = ? \\ A_{345} = ? \quad A_{67} = ?$$

$$m = 0,04 \text{ кг} \\ h = 1 \text{ м} \\ R = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м} \\ \mu = 0,03 \\ s = 3 \text{ м} \\ g = 10 \text{ м/с}$$

Решение

- 1) $A_{34} = -m \cdot g \cdot R, A_{34} = -0,1 \text{ Дж}.$
- 2) $A_{45} = m \cdot g \cdot R, A_{45} = 0,1 \text{ Дж}.$
- 3) $A_{345} = A_{34} + A_{45}, A_{345} = 0.$
- 4) $A_{67} = -F_{\text{тр}}s, A_{67} = -\mu mgs,$
 $A_{67} = -0,036 \text{ Дж} = -36 \text{ мДж}.$

Рис. 217



Ответ: $A_{34} = -0,1$ Дж, $A_{45} = 0,1$ Дж, $A_{345} = 0$; $A_{67} = -36$ мДж.

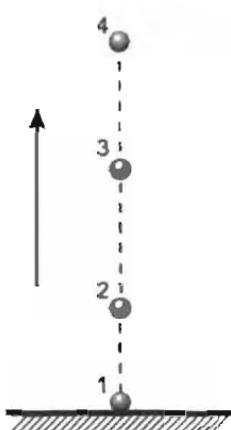


Рис. 218

?

1. Сформулируйте закон сохранения механической энергии. 2. Запишите математически закон сохранения механической энергии. 3. Каковы условия применимости закона сохранения механической энергии?

● Выберите правильный ответ.

Мяч брошен вертикально вверх. В какой точке траектории — 1, 2, 3, 4, отмеченных на рисунке 218, полная механическая энергия мяча имеет максимальное значение?

- А. В точке 1.
- Б. В точке 2.
- В. В точке 3.
- Г. В точке 4.
- Д. Во всех точках одинакова.

■ 1. Девочка бросает с поверхности земли мяч массой 50 г вертикально вверх со скоростью 11,8 м/с. Мяч, поднявшись на высоту 7 м, снова падает на землю (рис. 219). Чему равна кинетическая и потенциальная энергия мяча в положениях 1, 2 и 3? Трением мяча о воздух пренебречь.

2. Шарик массой 0,05 кг скатывается с высоты 1,5 м по поверхности, форма которой изображена на рисунке 220. Трением о поверхность и вращением шарика пренебречь. 1) Чему равна кинетическая энергия шарика в положении 2? 2) Чему равна кинетическая энергия шарика в положении 3? 3) Чему равна кинетическая энергия шарика в положении 4? 4) Чему равна кинетическая энергия шарика в положении 5?

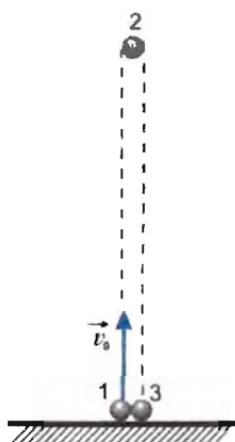


Рис. 219

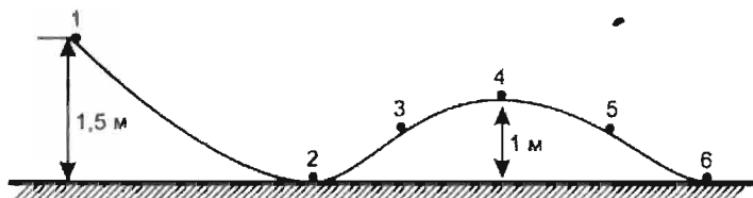


Рис. 220

ПОВТОРИТЕЛЬНО-ОБОБЩАЮЩИЙ РАЗДЕЛ

- ? 1. Какова основная задача механики?
2. При каком условии тело можно считать материальной точкой?
3. Заполните таблицу, внеся сведения о равномерном прямолинейном движении.

| | |
|---------------------------------------------------------|--|
| Определение | |
| Что является характеристикой движения и почему? | |
| График зависимости скорости от времени движения | |
| Уравнение перемещения | |
| График зависимости пути от времени | |
| Уравнение для расчета координаты в любой момент времени | |
| График зависимости координаты от времени | |

4. Заполните таблицу, внеся сведения о равноускоренном прямолинейном движении.

| | |
|--------------------------------------------------------------|--|
| Определение | |
| Что является характеристикой движения и почему? | |
| Формула расчета ускорения | |
| График зависимости ускорения от времени движения | |
| Уравнение зависимости скорости от времени движения | |
| График зависимости скорости от времени движения | |
| Уравнение для расчета пройденного пути | |
| Уравнение для расчета координаты тела в любой момент времени | |

5. Расскажите о первом, втором и третьем законах Ньютона по плану:

а) формулировка закона; б) математическая запись закона; в) условия применимости закона.

6. Заполните таблицу.

| Сила | Природа силы | Формула расчета силы |
|---------------------------|--------------|----------------------|
| Сила всемирного тяготения | | |
| Сила тяжести | | |
| Сила упругости | | |
| Вес тела | | |
| Сила трения | | |

7. Зачем на шинах автомобилей, колесных тракторов делают глубокий рельефный рисунок (протектор)?

8. Зачем для повышения проходимости автомобиля по грязи или снегу на его колеса надевают цепи?

9. Зачем в гололедицу тротуары посыпают песком?

10. Зачем на подошвы спортивной обуви футболистов (бутсы) набивают кожаные шипы?

11. Зачем стапеля, по которым судно спускают на воду, обильно смазывают?

12. Почему по льду коньки скользят, а по гладкому полу нет?

13. Сформулируйте и запишите математически закон сохранения импульса. Каковы условия применимости закона сохранения импульса?

14. Сформулируйте и запишите математически закон сохранения механической энергии. Каковы условия применимости закона сохранения механической энергии?

15. Запишите формулу расчета механической работы. Поясните величины, входящие в эту формулу.

16. Что такое мощность? Запишите формулу расчета мощности. Поясните величины, входящие в формулу расчета мощности.

● Выберите правильный ответ.

1. В начале рабочего дня троллейбус вышел на маршруту линию, а вечером вернулся в тот же троллейбусный парк. За рабочий день показания счетчика увеличились на 250 км. Чему равны перемещение s и путь l , пройденный троллейбусом?

А. $s = 0$; $l = 250$ км.

Б. $s = 250$ км; $l = 250$ км.

В. $s = 0$; $l = 0$.

Г. $s = 250$ км; $l = 0$.

2. Характеристикой равномерного прямолинейного движения является...

- А. перемещение.**
Б. путь, пройденный телом.
В. скорость.
Г. ускорение.
- 3. Характеристикой равнотекущего прямолинейного движения является...**
- А. перемещение.**
Б. путь, пройденный телом.
В. скорость.
Г. ускорение.
- 4. Пассажирский поезд на некотором участке дороги движется равномерно и прямолинейно в направлении, указанном на рисунке 221 стрелкой. Мальчик, находящийся на верхней полке вагона, решил на опыте выяснить, в какую точку стола — 1, 2, 3 или 4 — упадет выпавшая из руки монета? Какой результат, на ваш взгляд, был получен мальчиком?**
- А. Монета упала в точку 1.**
Б. Монета упала в точку 2.
В. Монета оказалась в точке 3.
Г. Монета достигла точки 4.
- 5. На рисунке 222 изображена зависимость скорости движения тела от времени $v = v(t)$. На каком из участков тело движется равнотекущенно?**
- А. Только на участке OA .**
Б. Только на участке AB .
В. Только на участке BC .
Г. На участках OA и BC .

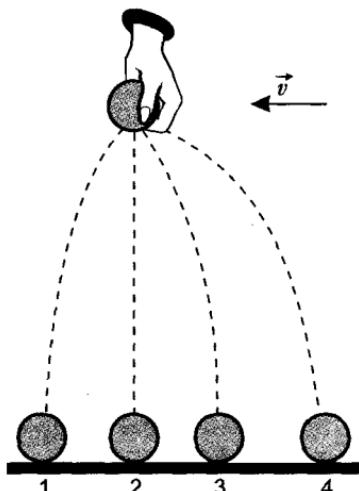


Рис. 221

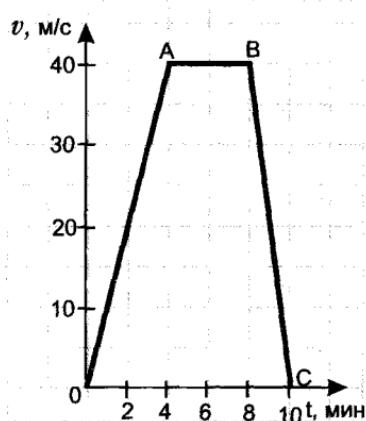


Рис. 222

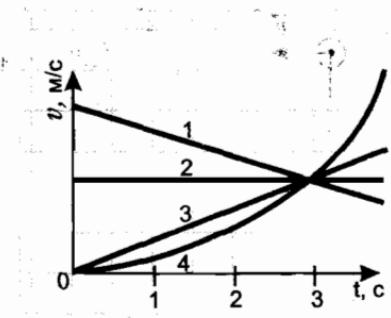


Рис. 223

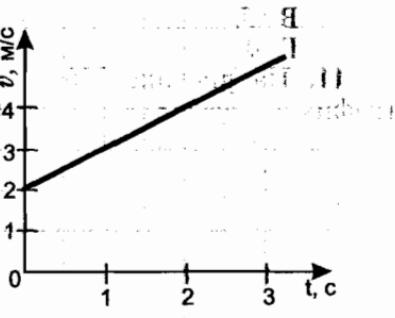


Рис. 224

6. На рисунке 223 изображены графики зависимости скоростей движения четырех тел от времени. Какое из тел прошло наибольший путь за первые 3 с движения?

- A. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. 4.

7. Какой путь пройдет автомобиль за 10 с после начала движения, двигаясь с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$?

- А. 0,1 м.
- Б. 1 м.
- В. 10 м.
- Г. 20 м.

8. На рисунке 224 изображен график зависимости скорости движения тела от времени. Используя данные графика, запишите уравнение зависимости скорости от времени движения тела.

- А. $v = 2 + 2t$, м/с.
- Б. $v = 2 + t$, м/с.
- В. $v = 4 + t$, м/с.
- Г. $v = 4 \pm 2t$, м/с.

9. Равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю. Движется это тело или находится в состоянии покоя?

- А. Тело движется равномерно и прямолинейно.
- Б. Тело движется равномерно по окружности в горизонтальной плоскости.
- В. Тело находится в состоянии покоя.
- Г. Тело движется равномерно и прямолинейно или находится в состоянии покоя.

10. На рисунке 225, а изображены направления векторов скорости и ускорения свободного падения движущегося тела. Как направлен вектор силы, действующей на тело (рис. 225, б)?

- А. 1.
- Б. 2.

В. 3.

Г. 4.

11. На рисунке 226 представлен график зависимости скорости движения тела от времени $v = v(t)$. На каком из участков — *аб*, *бс* или *cd* — тело движется равномерно?

- А.** Только на участке *аб*.
- Б.** Только на участке *бс*.
- В.** Только на участке *сд*.
- Г.** На участках *бс* и *cd*.

12. Два мальчика одинаковой массы взялись за руки. Первый мальчик толкает второго с силой 200 Н. С какой силой толкает второй мальчик первого?

- А.** 0.
- Б.** 100 Н.
- В.** 200 Н.
- Г.** 400 Н.

13. При каких условиях, перечисленных ниже, справедлив закон всемирного тяготения?

- А.** Для любых неподвижных тел.
- Б.** Только для заряженных тел.
- В.** Только для намагниченных тел.
- Г.** Только для материальных точек.

14. Сила гравитационного взаимодействия между двумя телами массами $m_1 = m_2 = 1$ кг на расстоянии R равна F . Чему будет равна сила гравитационного взаимодействия между шарами массами 2 кг и 5 кг на таком же расстоянии R между телами?

- А.** F .
- Б.** $2F$.
- В.** $10F$.
- Г.** $5F$.

15. Спортивный диск массой 2 кг брошен под углом к горизонту. В верхней точке траектории он имеет скорость 0,5 м/с (рис. 227). Чему равен модуль импульса диска и как направлен вектор импульса в этой точке? Сопротивлением воздуха пренебречь.

- А.** 2 кг·м/с, вправо.
- Б.** 0,5 кг·м/с, вправо.
- В.** 1 кг·м/с, вправо.
- Г.** 1 кг·м/с, влево.

16. Два кубика одинакового объема — стальной и еловый — движутся с одинаковыми скоростями. Ка-

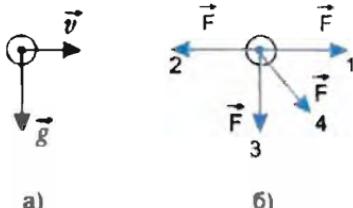


Рис. 225

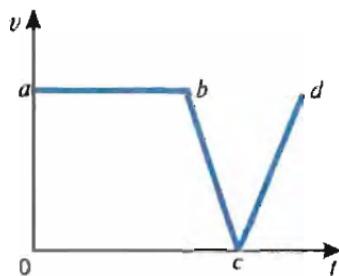


Рис. 226

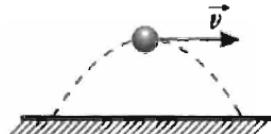


Рис. 227

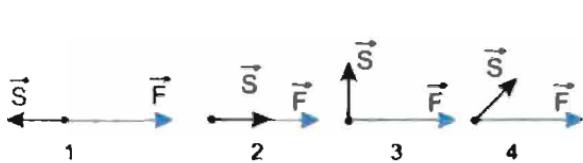


Рис. 228

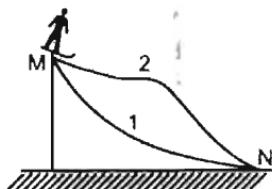


Рис. 229

кой из них обладает большим импульсом? Плотность стали $7600 \text{ кг}/\text{м}^3$, алюминия $360 \text{ кг}/\text{м}^3$.

- А. Импульсы кубиков одинаковы.
- Б. Импульс стального кубика больше.
- В. Импульс алюминиевого кубика больше.
- Г. По условию задачи нельзя сравнить импульсы кубиков.

17. На рисунке 228 изображены различные варианты взаимного расположения вектора силы, действующей на тело, и перемещения, совершенного этим телом. В каком случае работа силы будет равна нулю?

- А. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. 4.

18. Лыжник скатывается с горы от точки M до точки N по одной из двух траекторий, изображенных на рисунке 229. При движении по какой траектории работа силы тяжести будет иметь наибольшее значение?

- А. 1.
- Б. 2.
- В. По обеим траекториям работа силы тяжести равна нулю.
- Г. По обеим траекториям работа силы тяжести одинакова.

19. На рисунке 230 изображено движение футбольного мяча массой 400 г из положения 1 в положение 3. Чему равна работа силы тяжести при перемещении мяча из положения 1 в положение 3?

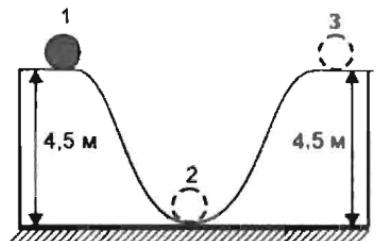


Рис. 230

- А. 18000 Дж .
- Б. 18 Дж .
- В. 36 Дж .
- Г. 0 .

20. Тело массой m находится на высоте h над поверхностью Земли (рис. 231). Затем тело отпускают, и оно свободно падает. Что можно сказать о полной механической энергии тела в положениях 1, 2 и 3?

- А. $E_1 > E_2 > E_3$.
 Б. $E_1 < E_2 < E_3$.
 В. $E_1 = E_2 = E_3 = 0$.
 Г. $E_1 = E_2 = E_3$.

21. Шарик массой 0,05 кг скатывается с высоты 15 м по поверхности, форма которой изображена на рисунке 232. Чему равна кинетическая энергия шарика в положении 4? Трением пренебречь.

- А. 7,5 Дж.
 Б. 5 Дж.
 В. 2,5 Дж.
 Г. 0.

22. Тело брошено вертикально вверх. Какой из графиков на рисунке 233 — 1, 2, 3 или 4 — соответствует графику зависимости полной механической энергии E от времени движения тела t ?

- А. 1.
 Б. 2.
 В. 3.
 Г. 4.

■ 1. Мотоциклист движется по шоссе равномерно. На рисунке 234 изображен график зависимости пути от времени движения. Чему равна скорость мотоциклиста? Выразите скорость в м/с и км/ч.

2. Уравнение движения тела задано формулой:

$$x = 20 - 5t, \text{ м.}$$

Каков характер движения тела? Чему равна начальная координата тела? Чему равен модуль скорости движения тела? Каков физический смысл знака «минус» в уравнении $x = x(t)$?

3. Уравнение движения тела задано формулой:

$$x = 10t + 0,5t^2, \text{ м.}$$

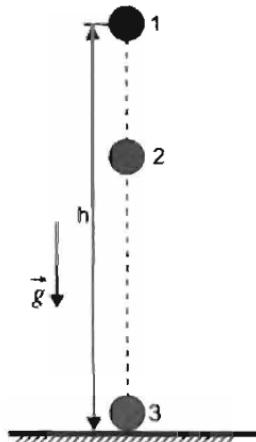


Рис. 231

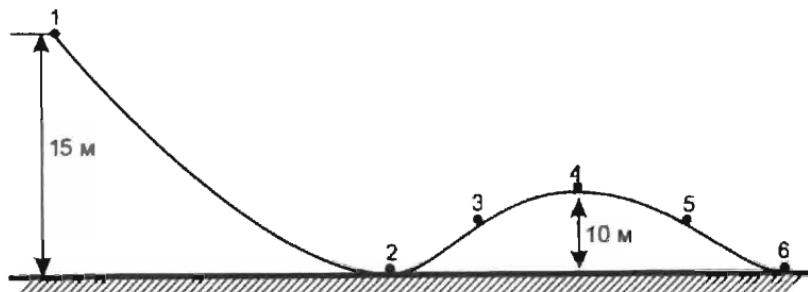


Рис. 232

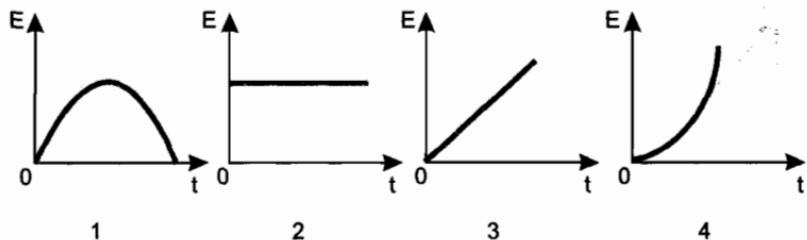


Рис. 233

Каков характер движения тела? Чему равна начальная координата тела? Чему равна начальная скорость тела? Чему равно ускорение тела? Каков физический смысл знака «плюс» в уравнении движения?

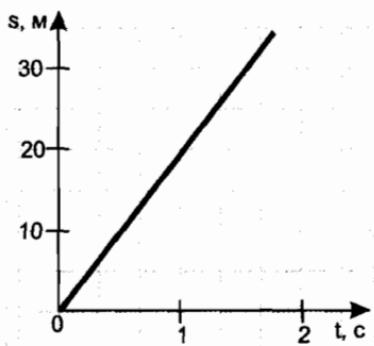


Рис. 234

4. На рисунке 235 изображен график зависимости скорости движения тела от времени $v = v(t)$. Масса тела 15 кг.

1) Используя график, выполните следующие задания: а) Определите характер движения тела в интервалах времени 0–5 с, 5–10 с, 10–20 с. б) Рассчитайте ускорение тела на каждом из участков.

2) Чему равна равнодействующая сил, действующих на тело на участке BC ?

5. С поверхности Земли стартует ракета-носитель, выводящая приборно-агрегатный отсек для исследования космического пространства. Во сколько раз сила притяжения Землей приборно-агрегатного отсека больше на поверхности Земли, чем на высоте четырех земных радиусов?

6. Трактор массой 11 т трогается с места и движется с ускорением $0,3 \text{ м/с}^2$. Чему равна сила тяги при разгоне трактора, если коэффициент трения 0,6?

* 7. Автомобиль массой 14 т, трогаясь с места, проходит первые 100 м за 15 с. Чему равна сила тяги, если коэффициент трения равен 0,85?

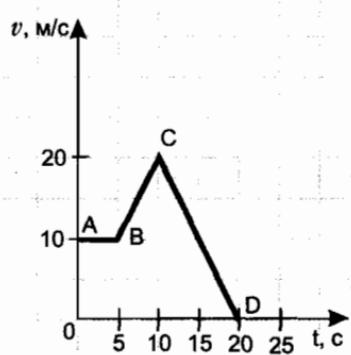


Рис. 235

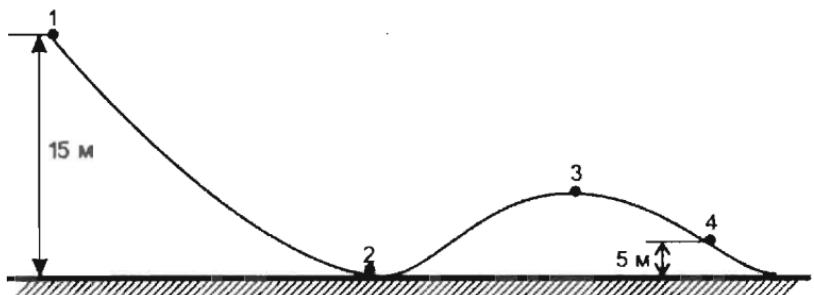


Рис. 236

8. Железнодорожный грузовой вагон массой 23 т движется со скоростью 2 м/с и встречает стоящую на пути платформу массой 10 т. С какой скоростью они станут двигаться после срабатывания автосцепки?

9. Шарик массой 0,05 кг скатывается с высоты 15 м по поверхности, форма которой изображена на рисунке 236. Трением пренебречь. Чему равна кинетическая энергия шарика в положении 2? в положении 4?

❶ 10. Легкий шар, двигаясь со скоростью 10 м/с, налетает на покоящийся тяжелый шар. Между шарами происходит абсолютно упругий удар. После удара шары разлетаются в противоположные стороны с одинаковыми скоростями. Во сколько раз отличаются массы шаров? Ответ обоснуйте.

❷ 1. Исследование зависимости координаты от времени

На столе находится тележка. Один ученик медленно тянет ее за веревку, а другой через каждую секунду ставит на столе около заднего колеса тележки указатели (рис. 237).

1) Когда тележка дойдет до правого края стола, измерьте расстояние от левого края стола до каждого из указателей.

2) Составьте таблицу результатов измерений координаты от времени с учетом погрешности измерений.

| $t, \text{ с}$ | 0 | $1 \pm 0,5$ | $2 \pm 0,5$ | $3 \pm 0,5$ | $4 \pm 0,5$ |
|-----------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $x, \text{ см}$ | | | | | |

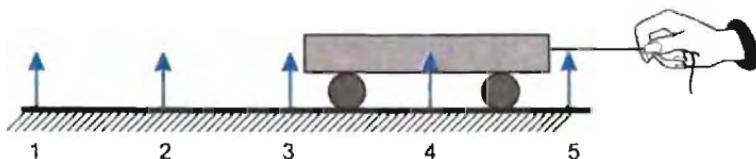


Рис. 237

3) Используя табличные данные, постройте график изменения координаты тележки от времени $x = x(t)$. Масштаб выберите самостоятельно.

2. Измерение коэффициента упругости пружины

Приборы и материалы: набор грузов по механике (масса каждого груза 100 г), линейка измерительная, динамометр лабораторный с закрытой листом бумаги шкалой, штатив с принадлежностями.

1) Расположите приборы так, как показано на рисунке 238.

2) К динамометру последовательно подвесьте один, два, три и четыре груза из набора по механике и каждый раз измеряйте удлинение пружины. Модуль силы упругости в каждом опыте равен модулю силы тяжести.

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| № опыта | Масса m , кг | Сила упругости $F_{упр}$, Н | Модуль удлинения Δl , 10^{-3} м |
|---------|----------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | 0,1 | | |
| 2 | 0,2 | | |
| 3 | 0,3 | | |
| 4 | 0,4 | | |

3) Используя табличные данные, постройте график зависимости силы упругости пружины от деформации (модуля удлинения) $F = F(\Delta l)$.

4) Рассчитайте значение коэффициента упругости пружины. Запишите вывод.

3. Измерение веса тела при ускорении движения

Приборы и материалы: динамометр лабораторный, цилиндр металлический или груз из набора по механике, нить длиной 15–20 см с петлями на концах.

1) Подвесьте к динамометру груз (или цилиндр) на нити. Какие силы действуют на груз (цилиндр)? Чему равен вес тела?

2) Поставьте динамометр вертикально на край стола, отклоните нить с цилиндром (грузом) на некоторый угол в сторону и отпустите (рис. 239).

3) Пронаблюдайте за изменением веса тела при его колебаниях. Определите положения, где вес наибольший, где наименьший.

4) Выводы по результатам эксперимента запишите в тетрадь.

4. Исследование зависимости силы трения скольжения от силы тяжести

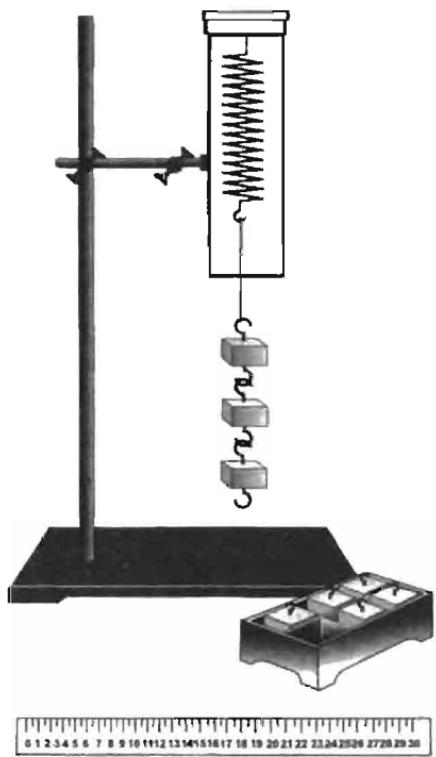


Рис. 238

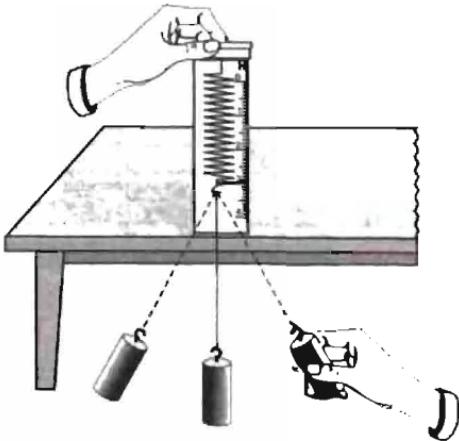


Рис. 239

Приборы и материалы: динамометр, трибометр (деревянная линейка), деревянный брускок и набор грузов.

1) Выскажите и запишите гипотезу о зависимости силы трения скольжения от силы тяжести.

2) Проведите несколько опытов, меняя массу грузов, а результаты измерений запишите в таблицу.

| № опыта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| Сила тяжести F , Н | | | | | | |
| Сила трения скольжения $F_{тр}$, Н | | | | | | |

3) Используя табличные данные, постройте график зависимости силы трения скольжения от силы тяжести $F_{тр} = F_{тр}(F)$ (по оси абсцисс отложите силу тяжести, по оси ординат — силу трения скольжения).

4) Подтверждает ли график вашу гипотезу о зависимости силы трения скольжения от силы тяжести? Вывод запишите в тетрадь.

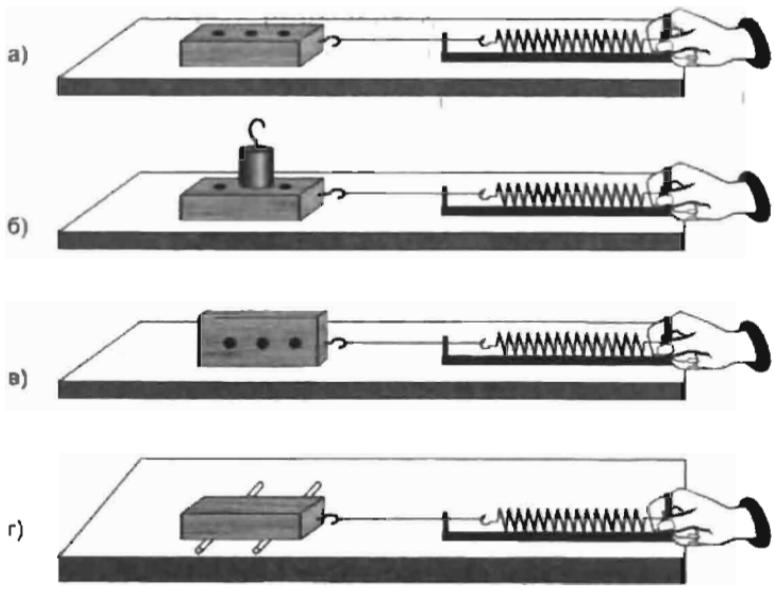


Рис. 240

5. Измерение силы трения

Приборы и материалы: динамометр, деревянный брускок, гиря, две спицы (два стержня или два круглых карандаша).

1) Положите деревянный брускок на грань большей площадью поверхности на поверхность стола. Прикрепите к нему динамометр, заставьте брускок двигаться равномерно и измерьте силу трения скольжения (рис. 240, а).

2) Поставьте на брускок гирю, заставьте брускок двигаться равномерно и измерьте силу трения скольжения (рис. 240, б).

3) Переверните брускок на грань меньшей площадью поверхности. Прикрепите к нему динамометр, заставьте брускок двигаться равномерно и измерьте силу трения скольжения (рис. 240, в).

4) Положите брускок гранью большей площадью поверхности на две спицы (два стержня или два карандаша) (рис. 240, г). Прикрепите к нему динамометр, заставьте брускок двигаться равномерно и измерьте силу трения качения.

5) По результатам эксперимента ответьте на вопросы: чему равна сила тяги в каждом из случаев? Чему равна сила трения в каждом из случаев? От чего зависит сила трения скольжения? От чего не зависит сила трения скольжения?



Рис. 241

Что вы можете сказать о соотношении между силой трения скольжения и силой трения качения?

6. Измерение работы силы тяжести

Приборы и материалы: линейка измерительная, шарик на нити, рычажные весы с набором гирь, кусок поролона или ваты.

- 1) С помощью рычажных весов определите массу шарика.
- 2) Поднимите шарик на высоту линейки и отпустите (рис. 241). В месте падения шарика на стол положите кусок паллона или ваты для смягчения удара.
- 3) Рассчитайте работу, совершающую силой тяжести относительно стола при падении шарика с высоты h .
- 4) Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| Масса шарика m , кг | Высота над столом h , м | Работа силы тяжести A , Дж |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| | | |

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

- § 16. ■ 1. $\approx 21,7 \text{ км}/\text{с}^2$,
2. Б.
3. 12 м/с.
- § 17. ■ $\approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.
- § 18. ■ 1. $\approx 7,5 \text{ кг}$.
2. $\approx 7,6 \cdot 10^8 \text{ Н}$.
3. $\approx 7 \text{ км}/\text{с}$.
4. $\approx 1,7 \text{ км}/\text{с}$; первая космическая скорость на Земле больше первой космической скорости на Луне в 4,7 раза.
5. $5219,7 \text{ с} \approx 87 \text{ мин}$.
6. $\approx 2 \text{ Н}$.
- § 19. ■ 1. $\approx 17,3 \text{ м}/\text{с}$.
2. 60 м; 20 м/с.
3. 50 м/с; 125 м.
4. 0; 45 м; 90 м.
5. В 3 раза.
- § 20. ■ 1. $10^{-3} \text{ м} = 1 \text{ см}$.
2. $F_{\text{упр}} = 75 \text{ Н}$; пружина деформировалась под действием силы тяжести $F = 75 \text{ Н}$.
3. 100 Н/м.
4. $0,54 \text{ кг} = 540 \text{ г}$.
- § 21. ■ 1. 900 Н.
2. $\approx 17,6 \text{ кН}; 15 \text{ кН}$.
3. 950 Н.
4. 67 м/с; $\approx 239 \text{ км}/\text{ч}$.
- § 22. ■ 1. 12,4 кН.
2. 0,04.
3. 5 с.
- § 23. ■ 1. 1,3 с.
2. ≈ 2 .
3. 30 м/с; 75 м.
- § 24. ■ 1. Импульсы равны.
2. Импульс свинцового шара примерно в 17,5 раза больше импульса березового шара.
3. $\Delta p = 1540 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$.
4. $F = 400 \text{ Н}$.
5. $v \approx 176,7 \text{ м}/\text{с}$.
6. $\Delta t \approx 8,9 \text{ мин}$.
- § 25. ■ 1. 3 м/с; скорость направлена в сторону движения шара большей массы
2. $\approx 3,6 \text{ м}/\text{с}$.
3. 1 м/с.
4. $\approx 0,02 \text{ м}/\text{с}$.
- § 27. ■ 1. 2 кДж.
2. 0,25 Дж.
3. 225 кДж.
4. 36 кДж.
5. $\approx 12,5 \text{ м}$.
- § 28. ■ 1. 120 Вт.
2. 39,6 МДж.

3. 90 с, или 1,5 мин. *Решение задачи*.

4. 55 кВт.

* 5. $\approx 11,6$ кН.

§ 29. ■ 1. ≈ 2 кДж

2. 12 Дж

3. 10 кг

4. 5 м/с

§ 30. ■ 1. $E_{k_1} \approx 3,5$ Дж, $E_{p_1} = 0$; $E_{k_2} = 0$, $E_{p_2} \approx 3,5$ Дж; $E_{k_3} \approx 3,5$ Дж, $E_{p_3} = 0$.

2. 1) $E_{k_2} = 0,75$ Дж; 2) $E_{k_3} = 0,5$ Дж; 3) $E_{k_4} = 0,25$ Дж;
4) $E_{k_5} = 0,5$ Дж.

Повторительно-обобщающий раздел

■ 1. 20 м/с; 72 км/ч.

2. $x_0 = 20$ м; $v = 5$ м/с.

3. $x_0 = 0$; $v_0 = 10$ м/с; $a = 1$ м/с².

4. 1) 6) $a_{AB} = 0$; $a_{BC} = 2$ м/с²; $a_{CD} = -2$ м/с²;

2) 30 Н.

5. В 25 раз.

6. 69,3 кН.

7. 131,6 кН.

8. $\approx 1,4$ м/с.

9. $E_{k_2} = 0,5$ Дж; $E_{k_4} = 5$ Дж;

10. $M > m$ в 3 раза.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аристотель 13
- Ватт 209
- Вес 151
- Взаимодействие 95
- гравитационное 113
 - сильное 114
 - слабое 113
 - электромагнитное 113
- Взвешивание 89
- Вязкость 178
- Гагарин 156
- Галилей 138
- Гельмгольц 218
- Гравитационная постоянная 119
- Гравитационное поле 114
- График пути 49
- скорости 49
 - ускорения 66
- Гук 149
- Движение криволинейное 6, 74
- механическое 7
 - равномерное 41
 - равноускоренное 62
 - по окружности 74, 78
 - поступательное 19
 - реактивное 195
 - сугочное 36
- Декарт 188
- Деформация 147
- Джоуль 203
- Динамика 4, 84
- Динамометр 99
- Единица
- импульса 187
 - массы 89
 - мощности 209
 - работы 203
 - силы 106
 - скорости 44
 - ускорения 63
 - энергии 212
- Закон
- всемирного тяготения 118
 - Галилея 138
 - Гука 149
- Ньютона второй 105, 189
- — первый 91
 - — третий 106
 - сохранения импульса 193
 - — механической энергии 216
- Импульс тела 187
- силы 188
- Инертность 88
- Инерция 88
- Кавендиш 123
- Кинематика 4
- Координата 22, 25, 70
- Координаты небесные 27
- Коперник 16
- Королев 199
- Коэффициент перегрузки 155
- сопротивления 178
 - трения покоя 169
 - — скольжения 169
 - упругости 149
- Масса гравитационная 120
- инертная 88
- Материальная точка 19
- Механика 4
- Мощность 208
- Начало координат 10
- Невесомость 158
- Ньютон 92
- Перегрузка 155
- Перемещение 7
- Период 77
- Принцип причинности 84, 98
- относительности Галилея 94
 - равноправности инерциальных систем отсчета 94
- Проекция вектора 24, 25
- Птолемей 15
- Путь 6, 67
- Работа механическая 201
- Ракета 198
- Свободное падение 141
- Сила 99

- натяжения 153
- равнодействующая (результатирующая) 100
- реакции опоры 152
- сопротивления 177
- трения 166
 - — качения 171
 - — покоя 167
 - — скольжения 169
- тяжести 127
- упругости 147

Система единиц

- Международная 89
- замкнутая 191
- инерциальная 91
- координат 10
- неинерциальная 92
- отсчета 10

Скорость 42

- вторая космическая 134
- мгновенная 59
- первая космическая 132
- равномерного прямолинейного движения 43
- средняя 56
- третья космическая 134

Тело отсчета 10

- Теорема о кинетической энергии 213
- Тормозной путь 180
- Траектория 6
- Трение жидкое 177
 - покоя 166
 - сухое 172

Ускорение 63

- нормальное (центростремительное) 80
- свободного падения 130, 140

Частота 75

Центр тяжести 128

Циолковский 198

Эклиптика 38

Энергия 211

- кинетическая 212
- механическая 216
- потенциальная 213

Эталон килограмма 89

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧТО ИЗУЧАЕТ МЕХАНИКА 4

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Глава I. КИНЕМАТИКА

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 1. Сведения о движении тел | 4 |
| § 2. Система отсчета. Относительность движения | 10 |
| § 3. Поступательное движение. Материальная точка | 18 |
| § 4. Определение положения тела | 21 |
| § 5. Географические и небесные координаты | 27 |
| § 6. Видимые движения звезд, Солнца и планет | 35 |
| § 7. Равномерное движение | 41 |
| § 8. Способы описания равномерного прямолинейного движения | 48 |
| § 9. Средняя и мгновенная скорость тела | 56 |
| § 10. Равноускоренное прямолинейное движение | 62 |
| § 11. Путь и координата при равноускоренном прямолинейном движении | 67 |
| § 12. Движение по окружности | 74 |

Глава II. ДИНАМИКА

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 13. Причины движения тел. Инерция. Масса | 84 |
| § 14. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета | 91 |
| § 15. Взаимодействие тел. Сила. Сложение сил | 95 |
| § 16. Второй и третий законы Ньютона | 105 |
| § 17. Гравитационное поле. Закон всемирного тяготения | 113 |
| § 18. Сила тяжести | 126 |
| § 19. Свободное падение тел | 138 |
| § 20. Сила упругости. Закон Гука | 147 |
| § 21. Вес тела. Невесомость | 151 |
| § 22. Сила трения. Сухое трение | 165 |
| § 23. Сила сопротивления при движении тел в жидкостях и газах | 177 |

Глава III. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 24. Импульс тела. Импульс силы | 187 |
| § 25. Закон сохранения импульса | 191 |
| § 26. Реактивное движение. Области применения реактивного движения | 195 |
| § 27. Механическая работа | 202 |
| § 28. Мощность | 208 |

| | |
|-------------------------------------------------------|------------|
| § 29. Энергия тела | 211 |
| § 30. Закон сохранения механической энергии | 216 |
| ПОВТОРИТЕЛЬНО-ОБОЩАЮЩИЙ РАЗДЕЛ | 221 |
| <i>Ответы к задачам</i> | 234 |
| <i>Предметно-именной указатель</i> | 236 |

Учебное издание

**Фадеева Алевтина Алексеевна, Киселев Дмитрий Федорович,
Засов Анатолий Владимирович, Кононович Эдвард Владимирович**

ФИЗИКА

Механика с основами общей астрономии

Учебник для 8 класса общеобразовательных учреждений

Зав. редакцией Г. Н. Федина

Редактор Т. П. Каткова

Младший редактор Л. А. Крикунова

Художественный редактор В. Н. Алексеев

Художники Т. В. Конде, О. К. Нихамовская

**Техническое редактирование и компьютерная верстка Н. А. Разворотневой
Корректоры Л. А. Ермолина, И. Б. Окунева, А. В. Рудакова**

Отпечатано с диапозитивов, изготовленных в издательстве «Просвещение».

**Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000.
Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано к печати 19.04.02. Формат 60×90/_.
Бумага писчая. Гарнитура NewtonC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15+0,31 форз.
Усл. кр.-отт. 31,6. Уч.-изд. л. 13,37+0,42 форз. Тираж 10 000 экз. Заказ № 3936 (к.п.).**

**Федеральное государственное унитарное предприятие ордена Трудового Красного
Знамени «Издательство «Просвещение» Министерства Российской Федерации по
делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. 127521, Москва,
3-й проезд Марьиной рощи. 41.**

**Федеральное государственное унитарное предприятие Смоленский полиграфический
комбинат Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.**



Издательство "ПРОСВЕЩЕНИЕ"

Мы предлагаем:

Учебники ▼ Гибкую систему скидок

Методическую литературу

Крупный и мелкий опт со склада

Научно-популярную литературу

издательства

Справочную литературу

Контейнерную отгрузку во все

Развивающие игры

регионы России и страны СНГ

Наглядные пособия и карты

Внимательное отношение к

Учебные мультимедийные курсы

каждому!

Возможность получения литературы с помощью службы

"Книга - почтой":

127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41,

издательство "Просвещение", "Книга-почтой",

тел.: (095) 289-5026

Вся информация о работе издательства, новинках, мероприятиях, планах выпуска, а также прямая связь с издательством

в Интернете

по адресу:

http

www.prossov.ru

e-mail

prossov@prossov.ru

Наш адрес:

127521, Москва,

3-й проезд Марьиной рощи, 41,

тел.: (095) 289-6233, 289-6333,

289-1383, 289-4484, 289-1431,

факс: (095) 289-6235, 289-6026,

289-5226

Проезд:

ст. метро "Белорусская", далее трол. 18 до

ост. "Гостиница "Северная".

авт. 12 до ост. "1-й Стрелецкий пер."

ст. метро "Рижская", далее трол. 18, 42;

авт. 84 до ост. "Гостиница "Северная".





Космонавт в космическом
пространстве



Автоматическая станция "МИР"
на фоне Земли



на Луну

Учебно-методический комплект
авторов А.А.Фадеевой, Д.Ф.Киселева,
А.В.Засова, Э.В.Кононовича содержит:

- учебники для 7, 8 и 9 классов
- книгу для учителя, 7–9 классы
- карточки-задания для 7, 8 и 9 классов

- Учебник "Физика, 8"
- входит в серию учебников для 7, 8 и 9 классов
 - является продолжением учебника "Физика, 7"
 - представляет интеграцию двух учебных дисциплин "Физика" и "Астрономия"
 - содержит материал по механике с основами общей астрономии
 - создан по авторской программе для 7–11 классов общеобразовательной школы
 - прошел экспериментальную проверку в школе

ISBN 5-09-010462-X



9 785090 104623

Интернет-магазин

OZON.ru



24945102

•Просвещение•