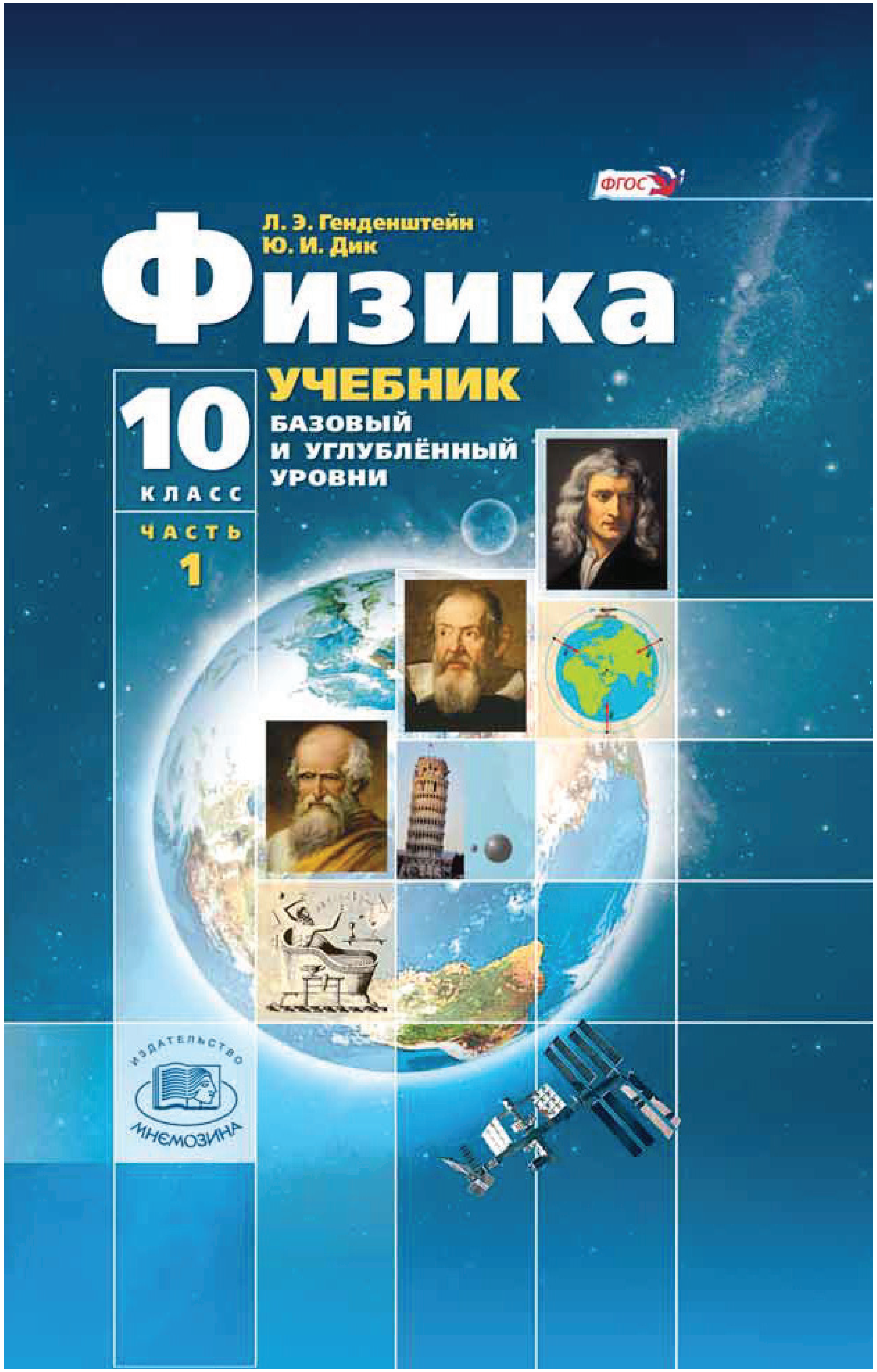
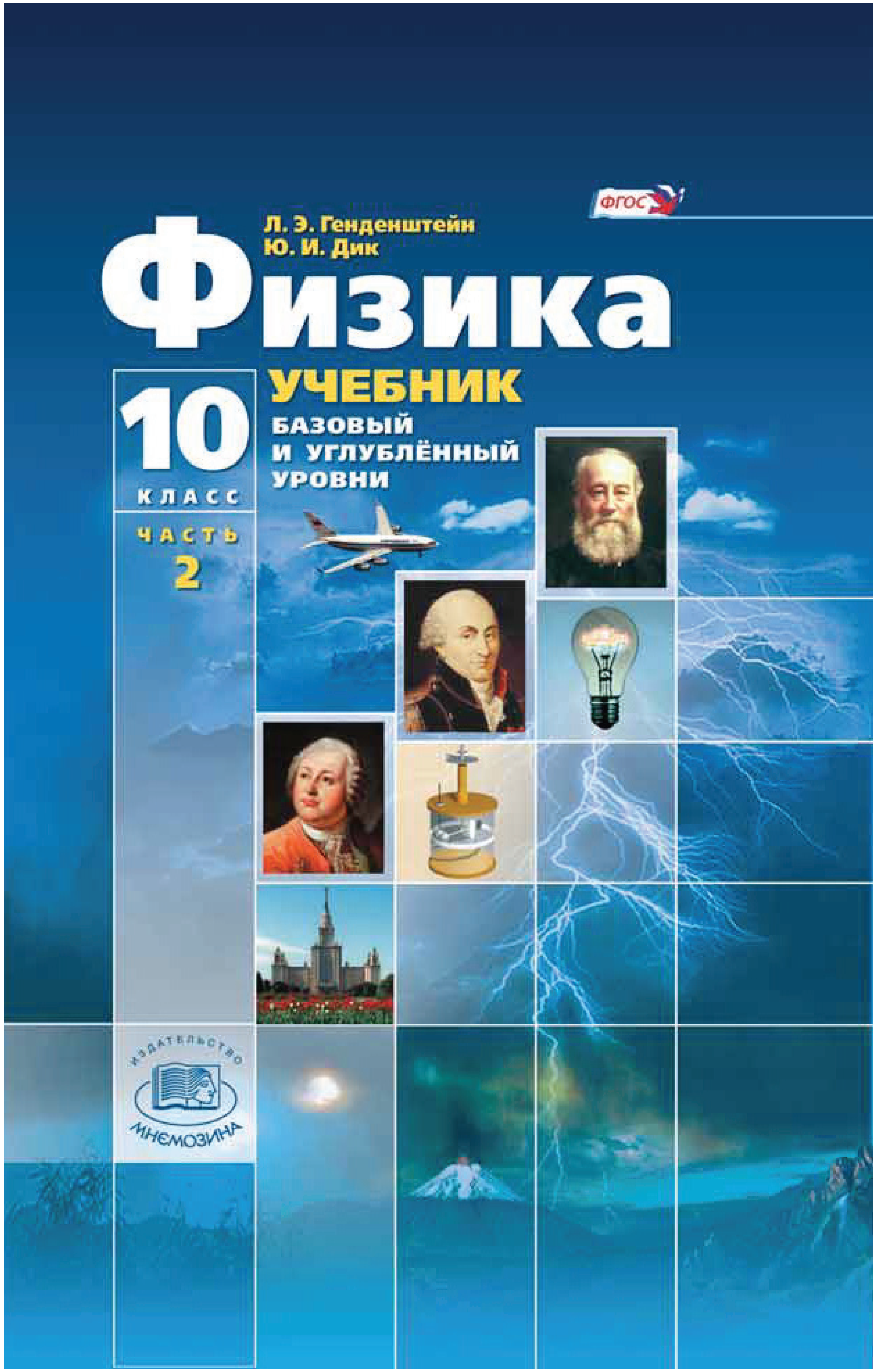

ФГОС
Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик
Физика
УЧЕБНИК
10 КЛАСС
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ
ЧАСТЬ 1
ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА


ФГОС
Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик
Физика
УЧЕБНИК
10 КЛАСС
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ
ЧАСТЬ 2
ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА

СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ УМК 10-11 кл. (БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ)

1. **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ. От 2 до 5 часов в неделю (и даже больше):**
   - ✓ Ученики, не готовящиеся к ЕГЭ, могут изучать только часть параграфа.
   - ✓ Есть достаточно трудные задачи для разбора на факультативах, элективах, при подготовке к олимпиадам).

2. **Достаточно ПОДРОБНО РАЗОБРАНЫ ВОПРОСЫ, ЧАСТО ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ НА ЕГЭ, но** недостаточно освещенные в некоторых учебниках:
   - ✓ Действия с векторами.
   - ✓ Сложение скоростей.
   - ✓ Насыщенный пар и влажность.
   - ✓ Циклические газовые процессы и др.

3. Возможность реально осуществить ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД к обучению.

- ✓ Сильные ученики в базовых классах могут самостоятельно изучать более сложный материал, обращаясь за консультациями к учителю.
- ✓ Дополнительные вопросы и задания в конце параграфа предназначены для углублённого уровня и подготовки к ЕГЭ.

4. УЧЕБНИК УЧИТ РЕШАТЬ ЗАДАЧИ.
Для обучения решению задач используется «Метод ключевых ситуаций»:

- ✓ Исследуются ситуации, лежащие в основе большинства задач школьного курса и ЕГЭ.
- ✓ Ученик овладевает культурой мышления, переходя от заучивания решений к исследованию ситуации, описанной в условии задачи.

5. Показана ДОРОГА К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ:

- ✓ К каждой трудной задаче построены «ступеньки»: это более простые задачи, которые входят в трудную задачу как её элементы.

6. **В качестве сюжетов многих задач в учебнике и задачнике используются задания из открытого банка заданий ЕГЭ.**

7. **Стирается резкая грань между теорией и задачами:**
    - ✓ Некоторые вопросы теории представлены в виде последовательности простых задач.
    - ✓ Простые задания на усвоение новых понятий приведены в тексте параграфа сразу же после введения этих понятий.

9. **В учебнике приведены подобные описания конкретных проектов для базового и повышенного уровней.**

10. **Задачник точно соответствует учебнику:**
    - ✓ Каждому параграфу учебника соответствует параграф задачника с таким же номером и названием.
    - ✓ Многие задачи в задачнике являются развитием задач, разобранных в учебнике.
    - ✓ Задачи в учебнике разбиты на три уровня: базовый, повышенный и углубленный.

11. Учебник полноцветный, а задачник — в 2 цвета.

12. Имеются диски с комментированными видеодемонстрациями по всем темам.

13. Готовятся электронные учебники.

14. Дополнение к учебнику 11-го класса: «МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КЛАССНОЙ ПОДГОТОВКИ К ЕГЭ» (в программе углублённого изучения для этого выделено специальное время).

15. Имеются Рабочие программы с поурочным планированием и методическими рекомендациями

МЕТОД КЛЮЧЕВЫХ СИТУАЦИЙ

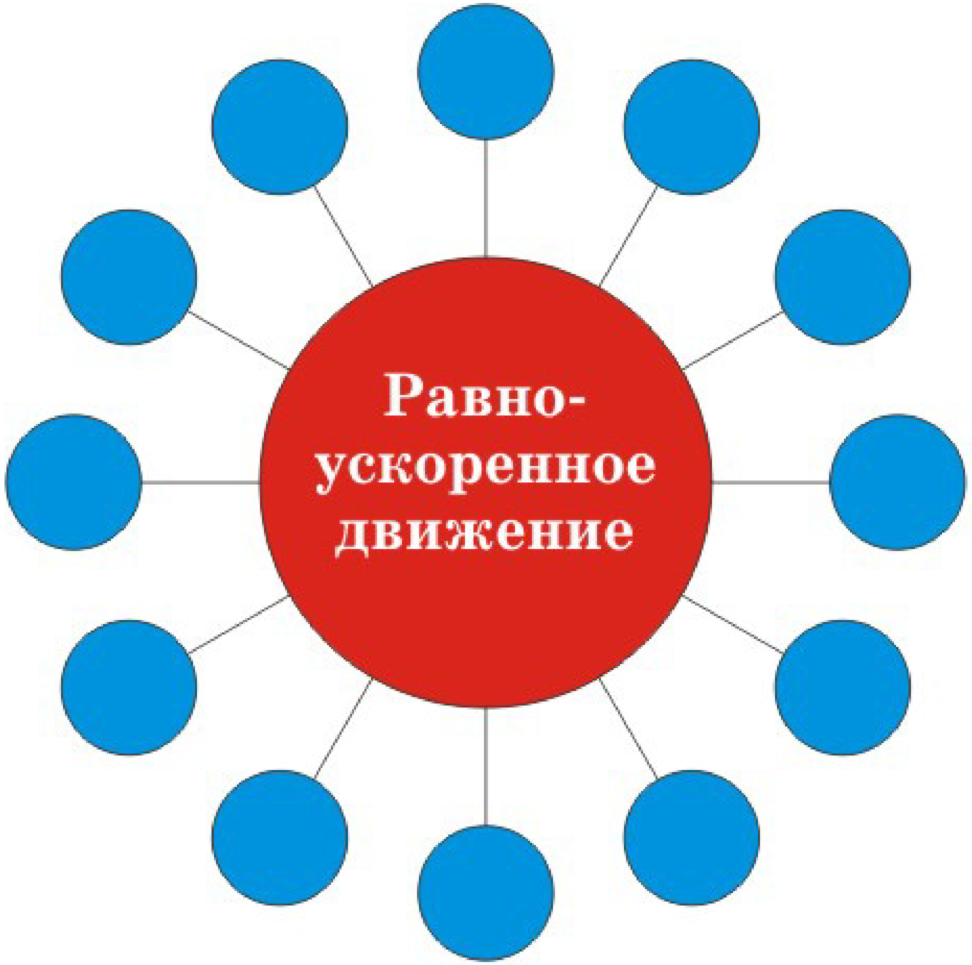
Реализация системно-деятельностного подхода при изучении физики и при подготовке к ГИА и ЕГЭ

Решение задач — самое трудное в школьном курсе физики.

Для решения задач требуется не заучивание, а ПОНИМАНИЕ.

Задачи — не приложение к «теории», а *её составная часть*.

• Задач — ***тысячи***, а ситуаций, на которых основаны сюжеты задач — ***десятки***:



- Надо ***изучать ситуации***: находить соотношения между входящими в игру физическими величинами.

- ***Творческая*** деятельность — важно для учителей и для учеников — многократно повышается эффективность.

- Стирается искусственная грань между теорией и задачами в курсе физики.

- Не от теории к задачам, а ***от задач к теории*** (Ньютон: «***Примеры при обучении полезнее правил***»).

Обучающие и контролирующие задачи

Часто их не разделяют, хотя у них разные «цели и задачи».

Обучающие задачи

- ***Раскрываются*** основные свойства физических понятий и явлений, а также приемы их исследования с целью ***обучения***.
- ***Поэтапный разбор одной ситуации*** (тренировка фиксации внимания).
- Возможно ***несколько правильных ответов*** (стимулирует творчество, самостоятельность, препятствует списыванию).

Контролирующие задачи

- Уже известные свойства и приемы ***используются*** с целью проверить: ***знает*** ли их ученик.
- Часто затрагиваются ***несколько тем в одном задании*** (для комплексной проверки).
- ***Один правильный ответ*** (для ускорения проверки).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. КИНЕМАТИКА

§ 1. СИСТЕМА ОТСЧЁТА, ТРАЕКТОРИЯ, ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Механика изучает *механическое движение*, то есть *изменение положения тел друг относительно друга с течением времени*. Основная задача механики — определение положения тел в заданный момент времени, если известны положение и скорость тел в начальный момент.

Движение тел зависит от *взаимодействия* между ними. Но для изучения взаимодействий тел нужно овладеть понятиями, с помощью которых *описывают* движение тела. Это — *траектория* движения тела, его *перемещение*, *скорость* и *ускорение*. Раздел механики, в котором рассматривают *описание* движения тел, называют *кинематикой*.

1. СИСТЕМА ОТСЧЁТА

Из курса физики основной школы вы знаете, что *движение относительно*. Например, сидящий в кресле пассажир летящего самолёта (рис. 1.1) покоится относительно самолёта, однако относительно Земли он движется, причём довольно быстро. Кроме того, он движется относительно стюардессы, идущей вдоль рядов кресел.

Рис. 1.1

Поэтому прежде чем описывать движение тел, мы должны выбрать тело, относительно которого будем рассматривать положение всех тел в данной задаче. Это тело называют *телом отсчёта*.

Иногда тело отсчёта не указывают явно (когда из-за этого не может возникнуть недоразумений).

? **1.** Что принято за тело отсчёта в следующих случаях?

а) Автомобиль едет со скоростью 100 км/ч.
б) Стюардесса идёт со скоростью 1 м/с.
в) Скорость Луны равна 1 км/с.

С телом отсчёта связывают *систему координат* (рис. 1.2). Кроме того, для описания движения нужны *часы*.

Тело отсчёта, связанная с ним система координат и часы образуют *систему отсчёта*.

Рис. 1.2

2. МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА

Часто для описания движения тела достаточно задать движение только одной его точки. В таком случае тело мысленно заменяют одной точкой.

Тело, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, называют материальной точкой.

Тело можно считать материальной точкой в следующих случаях.

а) Когда *размеры тела малы по сравнению с расстоянием, пройденным телом*. В этом случае различие в движении разных точек тела не существенно.

Например, самолёт можно считать материальной точкой, если надо найти время его перелёта между двумя городами (рис. 1.3). Но его нельзя считать материальной точкой при рассмотрении фигур высшего пилотажа.

Рис. 1.3

б) *При поступательном движении тела*. Так называют движение тела, при котором все его точки движутся одинаково, поэтому для описания движения тела можно задать движение только *одной* его точки. При поступательном движении отрезок, соединяющий любые две точки тела, остаётся параллельным самому себе.

При поступательном движении тело может двигаться вдоль прямой — например, соскальзывать с наклонной плоскости. Но оно может двигаться и по кривой линии. Так, поступательно движется кабинка колеса обозрения (рис. 1.4), если она не вращается вокруг своей оси. Отрезок, соединяющий середину пола кабинки с серединой её крыши, остаётся всё время вертикальным (на фотографии он показан красным).

Рис. 1.4

? **2.** Приведите пример задачи, в которой Землю можно считать материальной точкой, и задачи, в которой нельзя.

3. ТРАЕКТОРИЯ, ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

В дальнейшем мы будем рассматривать в основном такие задачи, в которых тело можно считать материальной точкой.

Когда тело движется, соответствующая ему материальная точка описывает в пространстве некоторую воображаемую линию, которую называют *траекторией движения* тела (или, для краткости, просто траекторией). Если тело оставляет за собой след, траектория тела становится видимой (рис. 1.5).

а *б*

Рис. 1.5

На рисунке 1.5, *а* изображена траектория *прямолинейного* движения тела, а на рисунке 1.5, *б* — *криволинейного*.

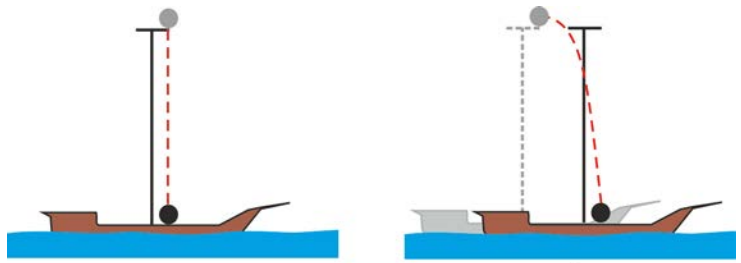
Если конечная точка траектории совпадает с начальной, траекторию называют *замкнутой*.

? **3.** Приведите свои примеры прямолинейного и криволинейного движения, а также движения по замкнутой траектории.

Зависит ли форма траектории от выбора системы отсчёта?

Рассмотрим пример, предложенный Галилеем.

С вершины мачты плывущего корабля на палубу падает ядро. В системе отсчёта, связанной с кораблём, траектория движения ядра — прямолинейный вертикальный отрезок (рис. 1.6, *а*). В системе же отсчёта, связанной с Землёй, ядро движется по кривой линии — параболе (рис. 1.6, *б*).



а *б*

Рис. 1.6

Итак, *форма траектории движения тела зависит от выбора системы отсчёта*.

Длину траектории называют *путём*, пройденным телом.

Если тело проходит какой-то участок траектории несколько раз, то путь равен длине этого участка, умноженной на число, показывающее, сколько раз тело прошло этот участок. Например, если автомобиль делает три круга по шоссе длиной 100 км, то пройденный им путь равен 300 км.

Путь является *скалярной* величиной (то есть характеризуется только числовым значением). Будем обозначать путь буквой l.

? **4.** Какие из графиков, приведённых на рисунке 1.7, не могут отображать зависимость пути от времени? Почему?

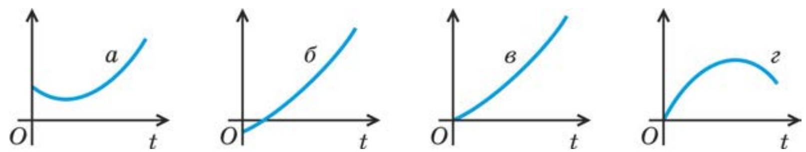


Рис. 1.7

Если за любые равные промежутки времени тело проходит равные пути, движение тела называют *равномерным*. Оно может быть как прямолинейным, так и криволинейным.

Если же пути, проходимые телом за равные промежутки времени, не одинаковы, движение называют *неравномерным*.

? **5.** Приведите примеры равномерного и неравномерного движения — как прямолинейного, так и криволинейного.

Пусть тело (материальная точка), двигаясь по некоторой траектории, переместилось из начального положения А в положение Б (рис. 1.8).

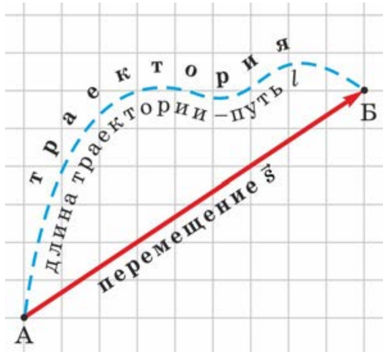


Рис. 1.8

Направленный отрезок, проведённый от начального положения тела к его положению в данный момент времени, называют *перемещением* $\vec{s}$ тела.

Перемещение является *векторной* величиной, которая характеризуется неотрицательным числовым значением (*модулем*) и *направлением*.

? **6.** Используя рисунок 1.8, найдите модуль перемещения материальной точки (масштаб на чертеже 1:1). Придумайте, как измерить пройденный путь, и найдите его значение.

? **7.** Как движется тело, если:

а) модуль его перемещения равен пройденному пути?

б) перемещение равно нулю, но путь не равен нулю?

? **8.** Изобразите в тетради как можно более простую траекторию движения, для которой:

а) путь в 3 раза больше модуля перемещения;

б) путь в $\pi/2$ раз больше модуля перемещения.

? **9.** Длина минутной и секундной стрелок часов равна 10 см. В начальный момент концы стрелок совпадают.

а) Чему равны модули перемещений концов этих стрелок за 20 мин?

б) Какой путь прошёл конец каждой стрелки за это время?

4. ДЕЙСТВИЯ С ВЕКТОРНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Векторные величины[1] широко используют в физике: это, например, перемещение, скорость, ускорение. Векторную величину обозначают буквой со стрелкой над ней, а модуль этой величины — той же буквой, но без стрелки. Например, перемещение обозначают $\vec{s}$, а модуль перемещения — s.

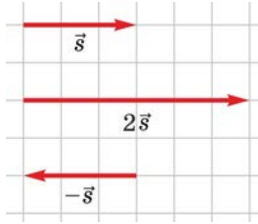


Рис. 1.9

Напомним действия с векторами, уже знакомые вам из курса математики.

а) *Умножение вектора на число*

При умножении вектора на число его модуль умножают на это число. Важно помнить: если это число отрицательно, то направление вектора *изменяется на противоположное*. На рисунке 1.9 изображены векторы $\vec{s}$, $2\vec{s}$ и $-\vec{s}$.

б) *Сложение векторов*

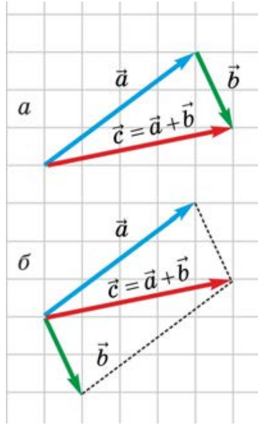


Рис. 1.10

Две векторные величины складывают по правилу треугольника (рис. 1.10, *а*) или по правилу параллелограмма (рис. 1.10, *б*). Результат сложения один и тот же, поэтому при выборе правила сложения исходят из соображений удобства.

в) *Вычитание векторов*

Чтобы вычесть из вектора $\vec{a}$ вектор $\vec{b}$, можно отложить эти векторы из одной точки и соединить направленным отрезком конец вектора $\vec{b}$ с концом вектора $\vec{a}$ (рис. 1.11). Этот направленный отрезок и есть вектор $\vec{c}=\vec{a}-\vec{b}$. Действительно, из рисунка 1.11 видно, что $\vec{a}=\vec{b}+\vec{c}$.

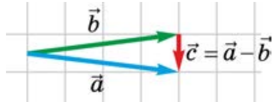


Рис. 1.11

Мы намеренно выбрали случай, когда векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равны по модулю. Обратите внимание на то, что при малом угле между такими векторами их разность представляет собой

[1] Часто для краткости их называют просто «векторами».

вектор, почти перпендикулярный векторам $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Это замечание пригодится нам в дальнейшем.

? **10.** Вектор $\vec{a}$ направлен вертикально вверх, а вектор $\vec{b}$ — по горизонтали вправо. Модуль вектора $\vec{a}$ равен 4, а модуль вектора $\vec{b}$ равен 3. Постройте вектор $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$. Чему равен его модуль?

Проекции векторных величин

Действия с векторными величинами часто упрощаются, если использовать *проекции*[1] этих величин на оси координат. Проекцию вектора обозначают той же буквой, что и сам вектор, но без стрелки и с индексом внизу, указывающим ось координат. Например, проекцию вектора $\vec{a}$ на ось x обозначают a_x.

Чтобы найти проекцию вектора на ось координат, проецируют изображающий этот вектор отрезок на эту ось, а затем приписывают проекции знак «+» или «−» в зависимости от того, как направлен данный вектор относительно выбранной оси. На рисунке 1.12 показано, как находить проекции векторов на оси координат x и y.

Обратите внимание, что проекция вектора может быть *положительной*, *отрицательной* или равной *нулю*.

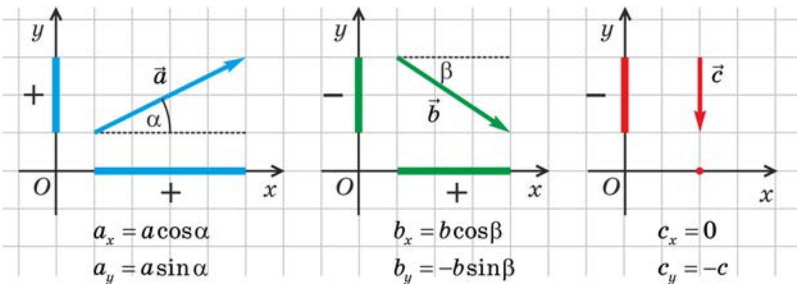


Рис. 1.12

При умножении вектора на число все проекции этого вектора умножаются на то же число.

При сложении векторов их проекции складываются, а при вычитании — вычитаются.

Например, если $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$, то $a_x = b_x + c_x$; $a_y = b_y + c_y$.

[1] В школьном курсе геометрии проекции вектора называют координатами вектора.

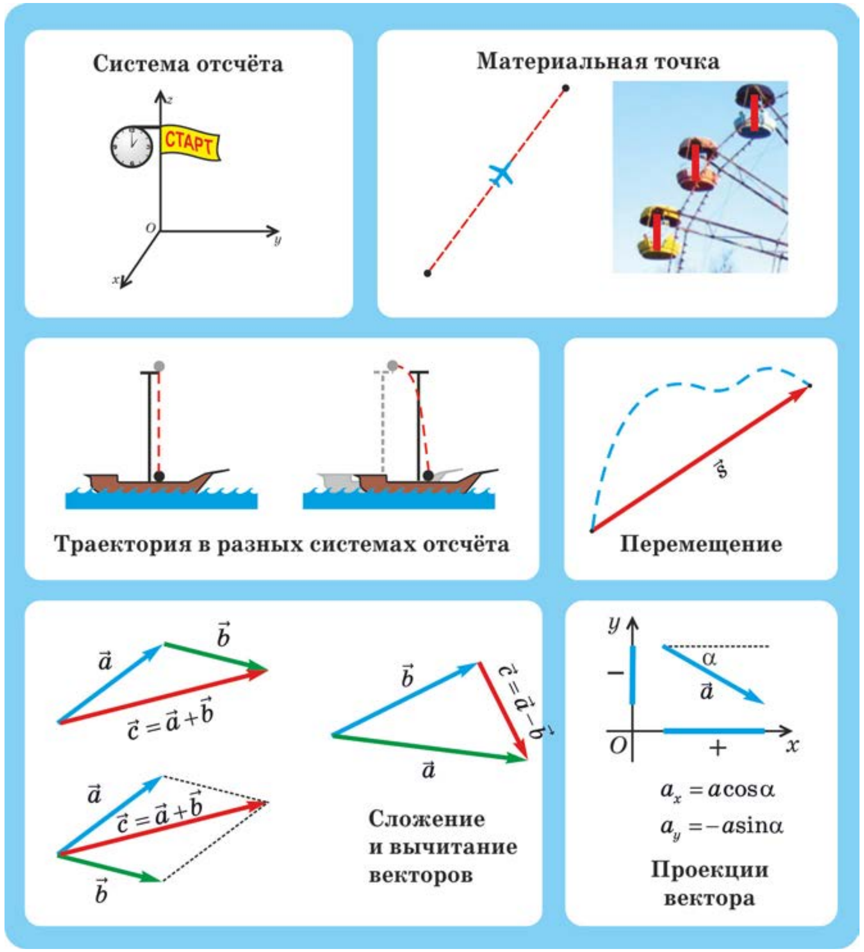
? **11.** Изобразите на чертеже в тетради:

а) вектор, у которого обе проекции на оси координат x, y отрицательны;

б) два вектора с общим началом, модули которых не равны, а проекции на ось x равны;

в) два вектора с общим началом, модули которых равны, а проекции на ось y не равны.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

12. Корабль совершил кругосветное путешествие за полгода. Является ли его траектория замкнутой в системе отсчёта, связанной:
а) с Землёй? б) с Солнцем?
Как изменились бы ответы, если бы путешествие длилось точно год?

13. Велосипедист едет по прямой дороге. Изобразите в тетради приблизительный вид траектории точки колеса велосипеда в системе отсчёта, связанной:
а) с велосипедистом;
б) с дорогой.

14. Реактивный самолёт А оставляет в небе след (рис. 15, *а*). Является ли этот след траекторией движения самолёта А в системе отсчёта, связанной:
а) с Землёй?
б) с самолётом Б, летящим рядом с самолётом А?
Поясните свои ответы.

15. Автомобиль поворачивает на 90° вправо по дуге окружности. При этом его левое переднее колесо прошло путь $l_л$. Выразите путь $l_п$, который прошло правое колесо, через $l_л$ и расстояние между колёсами d. Найдите числовое значение $l_п$, если $l_л$ = 10 м, d = 1,5 м. Сделайте пояснительный чертёж.

16. Вектор $\vec{a}$ имеет проекции a_x = 3 см, a_y = 5 см, а проекции вектора $\vec{b}$ равны b_x = 4 см, b_y = −2 см. Изобразите эти векторы и найдите графически вектор $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$. Чему равны проекции этого вектора?

17. Полярник вышел из палатки, расположенной точно на Северном полюсе, прошёл 5 км по прямой, затем в направлении точно на восток 15,71 км, после этого повернул налево и шёл по прямой ещё 5 км. Какова форма траектории полярника? Чему равен модуль перемещения? Сделайте в тетради пояснительный чертёж.

18. Турист переместился из пункта A в пункт B, а затем — в пункт C. Известно, что s_{AB} = 5 км, s_{AC} = 4 км, причём $\vec{s}_{BC} \perp \vec{s}_{AC}$. Чему равен s_{BC}? Сделайте в тетради пояснительный чертёж.

§ 2. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

1. СКОРОСТЬ

Поставим опыт

Толкнём тележку, находящуюся на горизонтальной поверхности, по которой она может двигаться практически без трения (можно использовать тележку на воздушной подушке).

На рисунке 2.1 изображены положения тележки через равные промежутки времени. Мы видим, что за *равные* промежутки времени тележка совершает *одинаковые* перемещения.

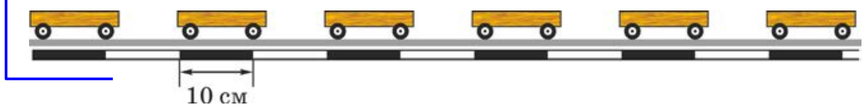


Рис. 2.1

Движение тела, при котором оно за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения, называют *прямолинейным равномерным*.

Это движение вы уже изучали в основной школе. Главная его характеристика — *скорость*.

Скоростью $\vec{v}$ **прямолинейного равномерного движения называют отношение перемещения** $\vec{s}$ **к промежутку времени** t**, за который произошло это перемещение:**

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}. \qquad (1)$$

Скорость — *векторная* величина. Единицей скорости в СИ является 1 м/с.

? 1. Используя рисунок 2.1, ответьте на следующие вопросы:
а) чему равна скорость тележки в опыте, изображённом на рисунке 2.1, если показаны положения тележки через каждые 0,2 с?
б) какой путь проехала бы тележка за 1 ч, если бы она продолжала двигаться прямолинейно равномерно?

Скорость автомобилей и поездов задают обычно в км/ч, а ракет и искусственных спутников — в км/с.

2. Человек идёт со скоростью 1 м/с. Какова его скорость в км/ч?

3. Автомобиль едет со скоростью 36 км/ч. Какой станет его скорость в км/ч, если она увеличится на 5 м/с?

2. ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ КООРДИНАТЫ ОТ ВРЕМЕНИ

Из определения скорости (1) получаем соотношение между проекциями скорости и перемещения (например, на ось x):

$$v_x = \frac{s_x}{t}. \qquad (2)$$

Направим ось x вдоль прямой, по которой движется тело, и совместим начало координат с начальным положением тела (оно отмечено светлым кружком на рисунке 2.2). Тогда

$$s_x = x, \qquad (3)$$

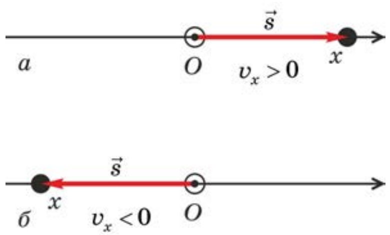


Рис. 2.2

причём s_x положительно, если тело переместилось в положительном направлении оси x (рис. 2.2, *а*), и отрицательно, если тело переместилось в отрицательном направлении оси x (рис. 2.2, *б*).

Из формул (2) и (3) получаем в этом случае

$$v_x = \frac{x}{t}. \qquad (4)$$

Проекция скорости $v_x > 0$, когда тело движется в положительном направлении оси x (рис. 2.2, *а*); если тело движется в отрицательном направлении оси x, то $v_x < 0$.

Из формулы (4) следует, что зависимость координаты тела от времени выражается формулой

$$x = v_x t. \qquad (5)$$

Итак, при прямолинейном равномерном движении из начала координат координата тела x *прямо пропорциональна* проекции скорости v_x. График такой зависимости — *отрезок прямой*,

один из концов которого совпадает с началом координат. Значение координаты x увеличивается со временем, если $v_x > 0$, то есть когда тело движется в положительном направлении оси x, и уменьшается со временем, если $v_x < 0$, то есть когда тело движется в отрицательном направлении оси x.

4. На рисунке 2.3 изображены графики зависимости координаты от времени для пешехода и велосипедиста.

а) Каким цветом изображён график для пешехода?

б) В каком направлении оси x ехал велосипедист?

в) Чему равны модули скорости пешехода и велосипедиста?

г) Перенесите графики в тетрадь и добавьте к ним график зависимости координаты от времени для автомобиля, едущего в отрицательном направлении оси x, если модуль его скорости в 5 раз больше модуля скорости велосипедиста.

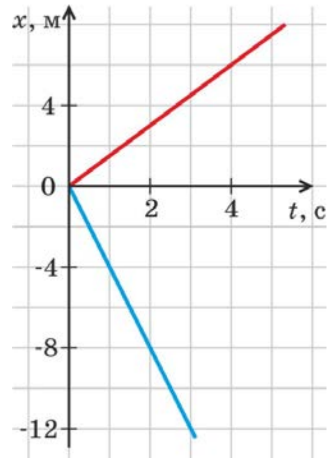


Рис. 2.3

Если в начальный момент тело находилось не в начале координат, а в точке с координатой x_0 (рис. 2.4), то

$$s_x = x - x_0. \qquad (6)$$

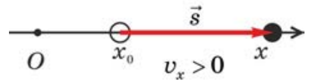


Рис. 2.4

Поэтому формула (2) принимает вид:

$$v_x = \frac{x - x_0}{t},$$

откуда следует, что в общем случае

$$x = x_0 + v_x t. \qquad (7)$$

Начальное значение координаты x_0 тоже может быть как положительным, так и отрицательным.

5. По аналогии с рисунком 2.4 сделайте в тетради чертежи, соответствующие:

а) $x_0 < 0$; $v_x > 0$; б) $x_0 < 0$; $v_x < 0$.

? **6.** На рисунке 2.5 изображены графики зависимости координаты от времени для тела, движущегося вдоль оси x.

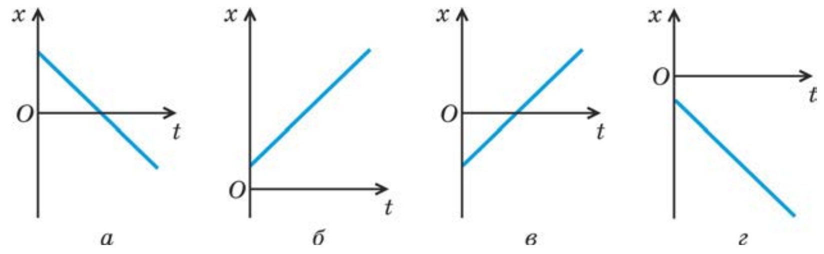


Рис. 2.5

а) Какие графики описывают движение тела в направлении, противоположном направлению оси x?

б) На каких графиках показано, что тело проходит через начало координат?

в) На каких графиках x_0 и v_x имеют противоположные знаки?

? **7.** На рисунке 2.6 изображены графики зависимости координаты от времени для велосипедиста и грузовика.

а) Каким цветом изображён график для грузовика?

б) Какому событию соответствует точка пересечения графиков?

в) Какие величины можно определить по этим графикам? Чему они равны?

г) Перенесите эти графики в тетрадь и добавьте к ним график зависимости координаты от времени для легкового автомобиля, который двигался прямолинейно и равномерно, встретился сначала с велосипедистом, а потом — с грузовиком, причём обе эти встречи произошли до того, как грузовик и велосипедист встретились друг с другом. В каком направлении оси x двигался этот легковой автомобиль?

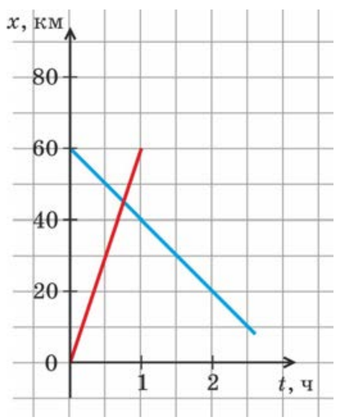
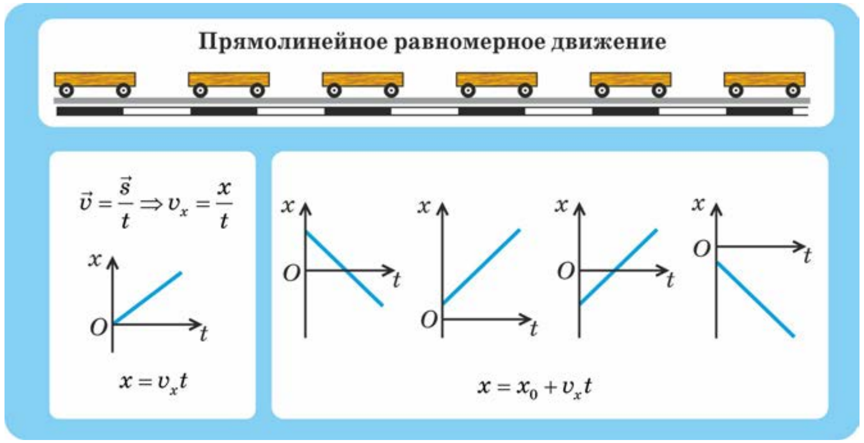


Рис. 2.6.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

8. В 2011 году был установлен очередной мировой рекорд в марафонском беге: дистанцию длиной 42 км 195 метров бегун пробежал за 2 ч 3 мин 38 с. А мировой рекорд 2009 года в забеге на 100 м был равен 9,58 с. Приняв, что в обоих случаях бегуны двигались равномерно, найдите скорость каждого из них (в м/с).

9. Искусственный спутник Земли движется по низкой круговой орбите со скоростью, равной примерно 8 км/с. Во сколько раз эта скорость больше скорости самого быстрого гоночного автомобиля? Рекорд скорости для гоночного автомобиля найдите в Интернете.

10. Начертите в тетради возможные графики зависимости координаты от времени для грузовика и легкового автомобиля, если известно, что они ехали в противоположных направлениях, встретились через 1 ч после начала наблюдения, а модуль скорости легкового автомобиля в 3 раза больше, чем модуль скорости грузовика.

11. Зависимость координаты от времени[1] для пешехода выражается формулой $x = 30 - 1,5t$, а для велосипедиста — формулой $x = 15 + 5t$. Изобразите на одном чертеже графики зависимости координаты от времени для пешехода

[1] Здесь и далее числовые значение величин приведены в единицах СИ.

2. ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Применим теперь описанный выше способ нахождения пути к прямолинейному равноускоренному движению.

Начальная скорость тела равна нулю

Направим ось x в сторону ускорения тела. Тогда $a_x = a$, $v_x = v$. Следовательно,

$$v = at. \qquad (1)$$

На рисунке 6.3 изображён график зависимости $v(t)$.

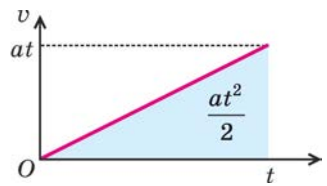


Рис. 6.3

? **1.** Используя рисунок 6.3, докажите, что при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости путь l выражается через модуль ускорения a и время движения t формулой

$$l = \frac{at^2}{2}. \qquad (2)$$

Главный вывод:

при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости пройденный телом путь пропорционален *квадрату* времени движения.

Этим равноускоренное движение существенно отличается от равномерного.

На рисунке 6.4 приведены графики зависимости пути от времени для двух тел, одно из которых движется равномерно, а другое — равноускоренно без начальной скорости.

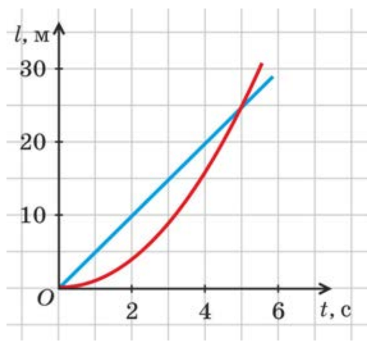


Рис. 6.4

? **2.** Рассмотрите рисунок 6.4 и ответьте на вопросы.

а) Каким цветом изображён график для тела, движущегося равноускоренно?

б) Чему равно ускорение этого тела?

в) Чему равны скорости тел в тот момент, когда они прошли одинаковый путь?

г) В какой момент времени скорости тел равны?

? **3.** Тронувшись с места, автомобиль за первые 4 с проехал расстояние 20 м. Движение автомобиля считайте прямолинейным равноускоренным. *Не вычисляя ускорения автомобиля*, определите, какое расстояние проедет автомобиль за: а) 8 с? б) 16 с? в) 2 с?

Найдём теперь зависимость проекции перемещения s_x от времени. В данном случае проекция ускорения на ось x положительна, поэтому $s_x = l$, $a_x = a$. Таким образом, из формулы (2) следует:

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}. \qquad (3)$$

Формулы (2) и (3) очень похожи, что приводит порой к ошибкам при решении простых задач. Дело в том, что значение проекции перемещения может быть *отрицательным*. Так будет, если ось x направлена противоположно перемещению: тогда $s_x < 0$. А путь отрицательным быть не может!

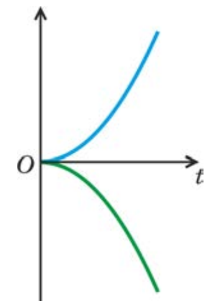


Рис. 6.5

? **4.** На рисунке 6.5 изображены графики зависимости от времени пути и проекции перемещения для некоторого тела. Какой цвет у графика проекции перемещения?

Начальная скорость тела не равна нулю

Напомним, что в таком случае зависимость проекции скорости от времени выражается формулой

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \qquad (4)$$

где v_{0x} — проекция начальной скорости на ось x.

Мы рассмотрим далее случай, когда $v_{0x} > 0$, $a_x > 0$. В этом случае снова можно воспользоваться тем, что путь численно равен площади фигуры под графиком зависимости скорости от времени[1].

[1] Другие комбинации знаков проекции начальной скорости и ускорения рассмотрите самостоятельно: в результате получится та же общая формула (5).

На рисунке 6.6 изображён график зависимости $v_x(t)$ при $v_{0x} > 0$, $a_x > 0$.

5. Используя рисунок 6.6, докажите, что при прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью проекция перемещения

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (5)$$

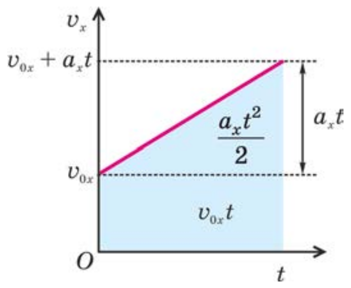


Рис. 6.6

Эта формула позволяет найти зависимость координаты x тела от времени. Напомним (см. формулу (5) § 2), что координата x тела связана с проекцией его перемещения s_x соотношением

$$s_x = x - x_0,$$

где x_0 — начальная координата тела. Следовательно,

$$x = x_0 + s_x. \quad (6)$$

Из формул (5), (6) получаем

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (7)$$

6. Зависимость координаты от времени для некоторого тела, движущегося вдоль оси x, выражается в единицах СИ формулой $x = 6 - 5t + t^2$.

а) Чему равна начальная координата тела?
б) Чему равна проекция начальной скорости на ось x?
в) Чему равна проекция ускорения на ось x?
г) Начертите график зависимости координаты x от времени.
д) Начертите график зависимости проекции скорости от времени.
е) В какой момент скорость тела равна нулю?
ж) Вернётся ли тело в начальную точку? Если да, то в какой момент (моменты) времени?
з) Пройдёт ли тело через начало координат? Если да, то в какой момент (моменты) времени?
и) Начертите график зависимости проекции перемещения от времени.
к) Начертите график зависимости пути от времени.

3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПУТЁМ И СКОРОСТЬЮ

При решении задач часто используют соотношения между путём, ускорением и скоростью (начальной v_0, конечной v или ими обеими). Выведем эти соотношения. Начнём с движения без начальной скорости. Из формулы (1) получаем для времени движения:

$$t = \frac{v}{a}. \quad (8)$$

Подставим это выражение в формулу (2) для пути:

$$l = \frac{at^2}{2} = \frac{a}{2}\left(\frac{v}{a}\right)^2 = \frac{v^2}{2a}. \quad (9)$$

Главный вывод:

при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости пройденный телом путь пропорционален *квадрату* конечной скорости.

7. Тронувшись с места, автомобиль набрал скорость 10 м/с на пути 40 м. Движение автомобиля считайте прямолинейным равноускоренным. *Не вычисляя ускорения автомобиля*, определите, какой путь от начала движения проехал автомобиль, когда его скорость была равна:
а) 20 м/с? б) 40 м/с? в) 5 м/с?

Соотношение (9) можно получить также, вспомнив, что путь численно равен площади фигуры, заключённой под графиком зависимости скорости от времени (рис. 6.7).

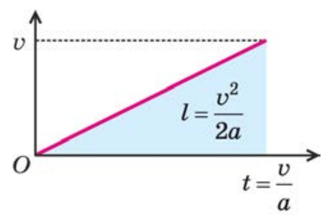


Рис. 6.7

Это соображение поможет вам легко справиться со следующим заданием.

8. Используя рисунок 6.8, докажите, что при торможении с постоянным ускорением до полной остановки тело проходит путь $l_т = \frac{v_0^2}{2a}$, где v_0 — начальная скорость тела, a — модуль ускорения.

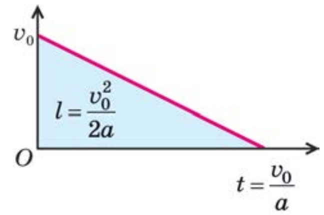


Рис. 6.8

5. КАТЯЩЕЕСЯ КОЛЕСО

Рассмотрим движение различных точек колеса автомобиля.

Пусть автомобиль едет со скоростью $\vec{v}$ (рис. 8.10), причём его колёса *катятся без проскальзывания*.

Рис. 8.10

Что означают слова «без проскальзывания»? Это значит, что *нижняя точка колеса A покоится относительно земли* (при этом шины оставляют чёткие следы). Этот факт — отправная точка для нахождения скорости всех других точек колеса — например, точек B, C, D на рисунке 8.10.

Чтобы найти скорость этих точек, удобно перейти в систему отсчёта, связанную с автомобилем, а потом вернуться в систему отсчёта, связанную с дорогой.

В системе отсчёта, связанной с автомобилем, *все* точки обода колеса движутся по окружности *с одной и той же по модулю скоростью*. Обозначим $v_{вр}$ модуль этой скорости, обусловленной вращением колеса вокруг своей оси. Выясним: как связаны скорость автомобиля v и скорость вращения $v_{вр}$ точек его колеса? Именно тут нам и поможет тот факт, что нижняя точка колеса A покоится относительно земли.

Заметим, что скорость $\vec{v}_{Aвр}$ *вращения* нижней точки A направлена *противоположно скорости автомобиля* (рис. 8.11).

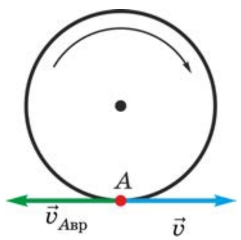


Рис. 8.11

Выразим через v и $v_{вр}$ скорость v_A точки A в системе отсчёта, связанной с дорогой. Согласно правилу сложения скоростей скорость точки A относительно дороги

$$\vec{v}_A = \vec{v}_{Aвр} + \vec{v}\,.$$

Итак, скорости $\vec{v}_{Aвр}$ и $\vec{v}$ направлены противоположно, а их сумма $\vec{v}_A = 0$. Следовательно,

$$v_{вр} = v,$$

то есть *скорость движения точек обода колеса в системе отсчёта, связанной с автомобилем, равна по модулю скорости автомобиля.*

? **15.** Докажите, что скорость точки C (рис. 8.9) относительно дороги равна $2v$.

Рис. 8.12

? **16.** Найдите направление и модуль скорости точек B и D (рис. 8.10) относительно земли.

? **17.** Катушка с ниткой (рис. 8.12) может катиться по горизонтальному столу *без проскальзывания*. Конец нити тянут в горизонтальном направлении со скоростью, равной по модулю u (рис. 8.13). Внутренний радиус катушки r, а внешний R. Докажите, что катушка будет двигаться вправо со скоростью $v = u\dfrac{R}{R+r}$.

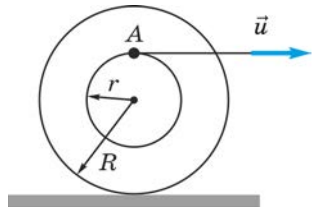


Рис. 8.13

Подсказка. Рассмотрите движение точки A, воспользовавшись сложением скоростей, а также тем фактом, что точка катушки, касающаяся стола, *покоится* относительно стола.

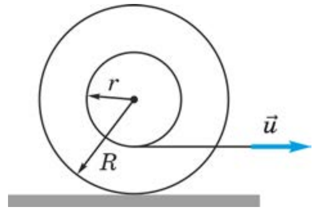


Рис. 8.14

? **18.** С какой скоростью v и *в каком направлении* будет двигаться катушка в случае, изображённом на рисунке 8.14?

Если вы выполнили это задание правильно, ответ может показаться вам неправдоподобным. Попробуйте проверить его *на опыте*, проследив за тем, чтобы катушка катилась *без проскальзывания*.

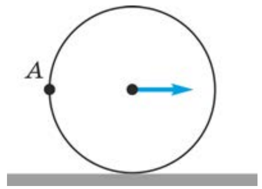


Рис. 8.15

? **19.** С какой скоростью едет велосипедист, если сорвавшаяся с колеса в точке A (рис. 8.15) капелька попала снова в эту же точку? Радиус колеса 30 см.

Подсказка. Перейдите в систему отсчёта, связанную с велосипедистом.

ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ

§ 9. СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ И ПЕРЕХОД В ДРУГУЮ СИСТЕМУ ОТСЧЁТА ПРИ ДВИЖЕНИИ НА ПЛОСКОСТИ

1. СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Пусть человек идёт *поперёк* плота, плывущего по реке. При этом скорость человека *относительно плота* перпендикулярна скорости течения (рис. 9.1, вид сверху).

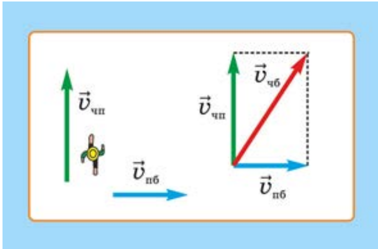


Рис. 9.1

Из правила сложения скоростей (см. § 3) следует:

$$\vec{v}_{чб} = \vec{v}_{чп} + \vec{v}_{пб}, \qquad (1)$$

где $\vec{v}_{чб}$ — скорость человека относительно берега, $\vec{v}_{чп}$ — скорость человека относительно плота, $\vec{v}_{пб}$ — скорость плота относительно берега (скорость течения).

На рисунке 9.1 справа показано, как графически найти скорость человека относительно берега (красная стрелка). Мы видим, что человек движется *не перпендикулярно* берегу, поскольку его (вместе с плотом) сносит течением.

Во время переправы через реку лодку тоже сносит течением. Если скорость $\vec{v}_{лв}$ лодки *относительно воды* направлена перпендикулярно течению, то её скорость $\vec{v}_{лб}$ относительно берега (красная стрелка) будет направлена не перпендикулярно берегу, а под некоторым углом α к этому перпендикуляру (рис. 9.2).

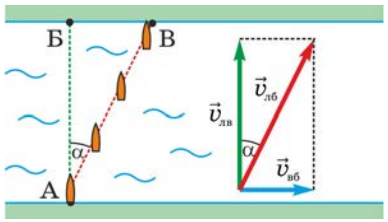


Рис. 9.2

Поэтому лодка попадёт не в точку Б, находящуюся точно напротив начальной точки А, а в точку В, которая расположена ниже точки Б по течению.

На рисунке 9.2 для наглядности изображены некоторые промежуточные положения лодки, чтобы было видно, что она всё время держит курс перпендикулярно берегу, но течение сносит её во время переправы.

? **1.** Моторная лодка переправляется через реку шириной 60 м. Скорость лодки относительно воды направлена перпендикулярно берегу и равна 2 м/с, а скорость течения равна 1 м/с.
а) Сколько времени займёт переправа?
б) Насколько снесёт лодку по течению за время переправы?
в) Какой угол составляет скорость лодки *относительно берега* с перпендикуляром к берегу?

Обратите внимание: *если скорость лодки относительно воды перпендикулярна берегу, течение не влияет на время переправы*.

? **2.** Объясните, почему переправа через реку занимает *кратчайшее время*, когда скорость лодки относительно воды направлена перпендикулярно берегу (хотя при этом переправа происходит не по кратчайшему пути относительно берега).

Рассмотрим теперь, как надо направить скорость лодки относительно воды, чтобы лодка попала в точку Б, расположенную точно напротив начальной точки А (рис. 9.3).

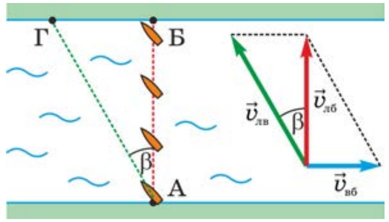


Рис. 9.3

В таком случае скорость $\vec{v}_{лб}$ лодки *относительно берега* должна быть перпендикулярна берегу (красная стрелка). А для этого необходимо, чтобы скорость $\vec{v}_{лв}$ лодки *относительно воды* была направлена под некоторым углом β к линии АБ — немного навстречу течению.

На рисунке 9.3 изображены некоторые промежуточные положения лодки, чтобы показать, что во время переправы киль лодки остаётся параллельным линии АГ, где точка Г расположена *выше* точки Б по течению, однако течение сносит лодку так, что она попадает в точку Б.

? **3.** Моторная лодка переправляется через реку шириной 60 м так, что попадает в точку Б, находящуюся точно напротив начальной точки А. Скорость лодки относительно воды равна 2 м/с, а скорость течения равна 1 м/с.

а) Какой угол составляет скорость лодки *относительно воды* с перпендикуляром к берегу?

б) Чему равна скорость лодки относительно берега?

в) Сколько времени занимает переправа?

Мы видим, что переправа по *кратчайшему пути* (относительно берега), занимает *большее время*, чем в случае, когда скорость лодки относительно воды направлена перпендикулярно берегу. Чтобы двигаться точно поперёк течения, лодке приходится «бороться» с ним.

? **4.** Может ли лодка попасть из точки А в точку Б, если её скорость относительно воды меньше скорости течения или равна ей? Дайте пояснительный чертёж.

Итак, мы видим, что даже в случае, когда течение или ветер направлены перпендикулярно траектории лодки, корабля или самолёта (относительно земли), это всё-таки тормозит движение. Правда, если скорость ветра мала по сравнению со скоростью самолёта, то задержка при боковом ветре существенно меньше, чем при встречном ветре той же скорости.

? **5.** В безветренную погоду перелёт самолёта из города Л в город К занимает 1 ч. Во время полёта дует ветер, скорость которого в 10 раз меньше скорости самолёта относительно воздуха. Сколько времени будет длиться перелёт, если ветер:

а) встречный? б) перпендикулярен трассе полёта?

2. ПЕРЕХОД В ДРУГУЮ СИСТЕМУ ОТСЧЁТА

На рисунке 9.4 схематически изображено положение двух кораблей в море и показаны их скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$.

Может ли произойти столкновение этих кораблей, если они будут продолжать следовать своими курсами? А если нет, то каким будет минимальное расстояние $d_{\min}$ между ними?

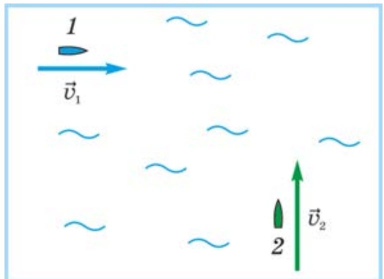


Рис. 9.4

Если рассматривать движение кораблей в системе отсчёта, связанной с землёй, ситуация представляется непростой: надо следить одновременно за *двумя* кораблями, не пропустив момент наибольшего их сближения.

Однако эта ситуация значительно упрощается, если перейти в систему отсчёта, связанную с *любым* из кораблей — например, с кораблём *2* (рис. 9.5).

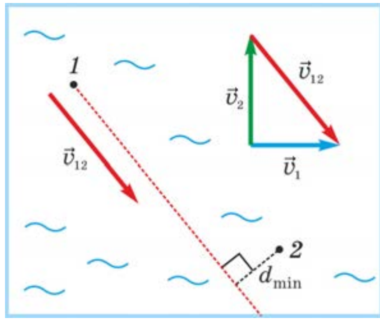


Рис. 9.5

В этой системе отсчёта корабль *2* покоится, поэтому надо следить за движением только *одного* корабля — корабля *1*. Чтобы найти его скорость $\vec{v}_{12}$ относительно корабля *2*, нужно, как мы уже знаем, вычесть из скорости $\vec{v}_1$ скорость $\vec{v}_2$:

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

В правой верхней части рисунка 9.5 показано, как графически найти скорость $\vec{v}_{12}$.

В системе отсчёта, связанной с кораблём *2*, корабль *1* движется вдоль прямой, параллельной его скорости $\vec{v}_{12}$ в этой системе отсчёта (красный пунктир).

Мы видим, что кораблям, к счастью, столкновение не грозит. А проведя перпендикуляр из положения корабля *2* к красному пунктиру, мы найдём и минимальное расстояние между кораблями $d_{\min}$.

? **6.** На рисунке 9.6 изображено положение автобуса (А) и такси (Т) в некоторый момент времени, обозначены их скорости. Две клетки соответствуют 100 м или 10 м/с.

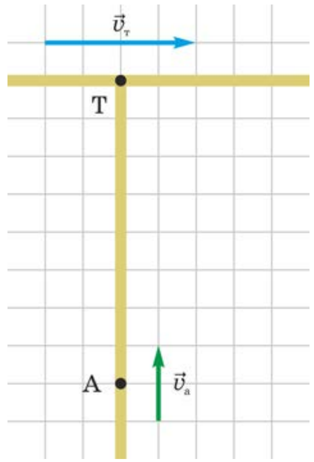


Рис. 9.6

Связанную с автобусом систему отсчёта называем далее для краткости «система А».

а) Перенесите рисунок в тетрадь и найдите графически скорость такси в системе А.

б) Начертите траекторию движения такси в системе А.

в) Найдите модуль скорости такси в системе А.

г) Найдите графически и аналитически наименьшее расстояние между такси и автобусом.

Подсказка. Воспользуйтесь подобием треугольников скоростей и перемещений в системе А.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

7. По реке плывёт квадратный плот со стороной a (рис. 9.7). По периметру плота идёт человек со скоростью $v_ч$ относительно плота. Скорость течения равна $v_т$.

а) Найдите выражение для пути, пройденного человеком *относительно берега*, если он двигался от A к B; от B к C; от C к D; от D к A.

б) Найдите отношение пути, пройденного человеком относительно берега, к пути, пройденного им относительно плота, если: 1) $v_ч = 2v_т$; 2) $v_ч = 0{,}5v_т$.

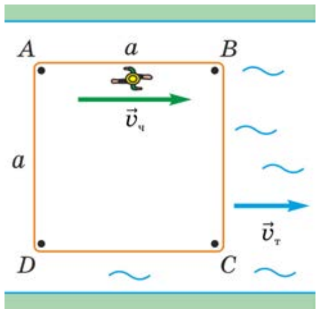


Рис. 9.7

8. Человек на моторной лодке отправляется из точки A с намерением попасть в точку B (рис. 9.8).

а) Скорость лодки относительно воды в 2 раза больше скорости течения. Под каким углом α к линии AB должна быть направлена скорость лодки относительно воды?

б) При какой минимальной скорости лодки относительно воды она сможет попасть в точку B, если скорость течения равна 1 м/с? Под каким углом к линии AB надо в этом случае направить киль лодки?

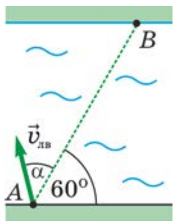


Рис. 9.8

§ 10. «СЕКРЕТЫ» ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Продолжим исследование прямолинейного равноускоренного движения, начатое в § 6.

1. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ

Напомним (см. § 6), что при прямолинейном движении в одном направлении путь l численно равен площади фигуры, заключённой под графиком зависимости $v(t)$.

Используя этот факт, докажем, что в этом случае средняя скорость равна среднему арифметическому начальной и конечной скорости:

$$v_{ср} = \frac{v_0 + v}{2}. \qquad (1)$$

Из определения средней скорости следует, что

$$l = v_{ср}t. \qquad (2)$$

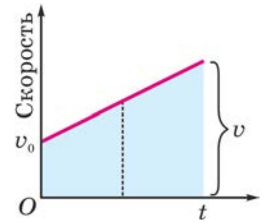


Рис. 10.1

Фигура, заключённая под графиком зависимости $v(t)$, является в данном случае трапецией с основаниями v_0 и v (рис. 10.1). Её площадь, равную l, можно выразить как произведение средней линии (она показана пунктиром) на высоту. Средняя линия данной трапеции равна полусумме её оснований v и v_0, а высота равна t. Поэтому получаем:

$$l = \frac{v_0 + v}{2}t. \qquad (3)$$

Левые части уравнений (2) и (3) одинаковы. Следовательно, их правые части равны, откуда и следует формула (1).

? **1.** Начальная скорость автомобиля на участке равна 50 км/ч, а конечная — 70 км/ч. Время движения на участке равно 1 мин. Чему равна длина участка, если автомобиль двигался равноускоренно?

Отметим полезные частные случаи применения формулы для средней скорости равноускоренного движения:

- если $v_0 = 0$, то $v_{ср} = v/2$;
- если $v = 0$, то $v_{ср} = v_0/2$.

Если движение тела не является равноускоренным, то его средняя скорость может быть и не равна среднему арифметическому начальной и конечной скорости!

Рассмотрим примеры.

? **2.** На рисунках 10.2 и 10.3 изображены графики зависимости скорости от времени для двух тел. В каком случае средняя скорость меньше среднего арифметического начальной и конечной скорости, а в каком — больше?

Подсказка. Сравните путь, пройденный каждым из данных тел, с путём, который прошло бы тело, двигавшееся в течение этого же промежутка времени *равноускоренно с той же начальной и конечной скоростью*.

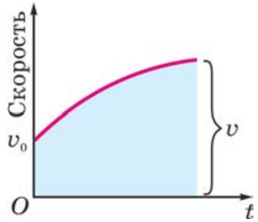


Рис. 10.2

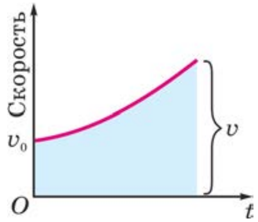


Рис. 10.3

? **3.** Автомобиль разогнался с места до скорости 20 м/с за 10 с, двигаясь равноускоренно. Чему равна средняя скорость автомобиля? Есть ли в условии лишние данные?

? **4.** Отойдя от станции, поезд метро разгонялся до некоторой скорости, а потом начал тормозить до остановки на следующей станции. Расстояние между станциями, равное 2 км, поезд проехал за 4 мин. При разгоне и торможении поезд двигался равноускоренно, но с *разными* по модулю ускорениями.

а) Начертите примерный график зависимости модуля скорости поезда от времени. Какую форму имеет фигура, заключённая под этим графиком?

б) Какова средняя скорость поезда?

в) Какова максимальная скорость поезда?

? **5.** Движущийся прямолинейно равноускоренно автомобиль проехал участок длиной 200 м. Начальная скорость автомобиля равна 10 м/с, а конечная — 30 м/с.

а) Какова средняя скорость автомобиля?

б) За какое время автомобиль проехал участок?

2. ПУТИ, ПРОХОДИМЫЕ ЗА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ РАВНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ

? **6.** Галилей доказал, что при прямолинейном равноускоренном движении *без начальной скорости* пути, проходимые телом за последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательные нечётные числа:

$$l_1 : l_2 : l_3 ... = 1 : 3 : 5 ...$$

Воспользовавшись рисунком 10.4, докажите это утверждение.

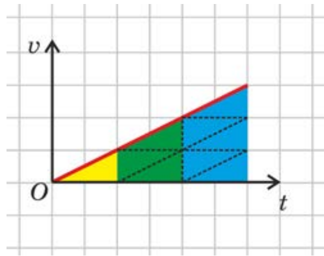


Рис. 10.4

Может быть, кто-то из вас вспомнит, что для свободного падения без начальной скорости такой результат уже был получен (см. задачу 5 из § 8).

А как обобщается эта красивая теорема (*теоремой* её назвал сам Галилей) на случай, когда начальная скорость тела не равна нулю?

? **7.** Объясните, почему для тела, движущегося прямолинейно равноускоренно в одном направлении, пути, проходимые за последовательные равные промежутки времени продолжительностью τ каждый, образуют арифметическую прогрессию:

$$l_2 = l_1 + \Delta, \; l_3 = l_1 + 2\Delta, \; ...$$

где $\Delta = a\tau^2$ (a — ускорение тела).

Подсказка. Воспользуйтесь рисунком 10.5.

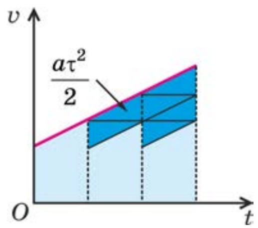


Рис. 10.5

? **8.** В первую секунду наблюдения движущийся равноускоренно автомобиль проехал 10 м, а во вторую — 12 м. Наблюдение длилось 5 с. Попробуйте ответить на следующие вопросы устно.

а) Какое расстояние автомобиль проехал за третью, четвёртую и пятую секунды?

б) С каким ускорением двигался автомобиль?

в) Чему равна начальная скорость автомобиля?

3. «ПОСЛЕДНЯЯ СЕКУНДА»

В некоторых задачах рассматривается *заключительный* этап движения. Например, дано, что тело за *последнюю* секунду падения пролетело 30 м, или что путь, пройденный падающим телом за *последнюю* секунду, в n раз больше, чем за предыдущую. Найдём удобный подход к решению подобных задач.

? **9.** Пусть тело движется прямолинейно равноускоренно в одном направлении, и его скорость увеличивается. Объясните, почему путь, пройденный телом, выражается через его *конечную* скорость v, ускорение и время движения формулой

$$l = vt - \frac{at^2}{2}.$$

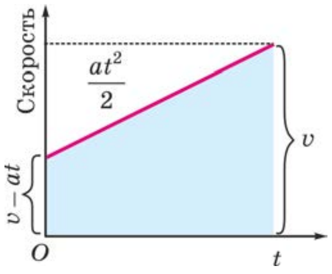


Рис. 10.6

Подсказка. Воспользуйтесь рисунком 10.6.

? **10.** Свободно падавшее без начальной скорости тело за последнюю секунду падения пролетело 30 м. Попробуйте ответить на следующие вопросы устно.

а) Чему равна скорость тела непосредственно перед ударом о землю?

б) Сколько времени падало тело?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

11. Известно, что путь, пройденный за последнюю секунду свободно падающим без начальной скорости телом, в 2 раза больше, чем за предыдущую.

а) Выразите путь, пройденный телом за последнюю секунду, через конечную скорость тела.

б) Выразите путь, пройденный телом за *две* последние секунду, через конечную скорость тела.

в) Используя условие задачи, напишите соотношение между значениями пути, пройденного за *последнюю* и *предпоследнюю* секунды.

г) Найдите конечную скорость тела.

д) Найдите время падения.

е) С какой высоты падало тело?

12. Лыжник съехал с горы длиной l за промежуток времени t, а затем проехал по горизонтальному участку расстояние d до полной остановки. Начальная скорость лыжника равна нулю, движение лыжника на обоих участках можно считать равноускоренным.

а) Чему равна скорость лыжника в конце спуска?

б) Сколько времени длилось торможение?

в) Чему равен модуль ускорения лыжника при движении по горизонтальному участку?

13. Автомобиль движется с постоянным ускорением a. На пути, равном l, скорость автомобиля увеличилась в n раз.

а) Во сколько раз средняя скорость автомобиля на данном участке больше начальной скорости?

б) Чему равна начальная скорость автомобиля?

14. Пути, проходимые за последовательные равные промежутки времени по 1 с телом, которое свободно падает с некоторой начальной скоростью, направленной вниз, относятся как последовательные натуральные числа

$$l_1 : l_2 : l_3 ... = 1 : 2 : 3....$$

а) Во сколько раз средняя скорость тела за вторую секунду больше, чем за первую?

б) Насколько средняя скорость тела за вторую секунду больше, чем за первую?

в) Чему равна начальная скорость тела?

г) Начертите график зависимости модуля скорости тела от времени.

§ 11. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО И ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

1. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Если сопротивлением воздуха можно пренебречь, то брошенное *как угодно* тело движется с ускорением свободного падения $\vec{g}$.

Рассмотрим сначала движение тела, брошенного *горизонтально* со скоростью $\vec{v}_0$ с высоты h над поверхностью земли (рис. 11.1).

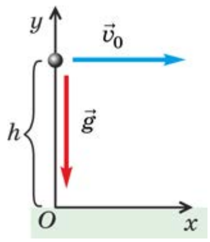


Рис. 11.1

В векторном виде зависимость скорости $\vec{v}$ тела от времени t выражается формулой

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t . \qquad (1)$$

В проекциях на оси координат:

$$v_x = v_0 , \qquad (2)$$

$$v_y = -gt . \qquad (3)$$

? **1.** Объясните, как из (2) и (3) получаются формулы:

$$x = v_0 t , \qquad (4)$$

$$y = h - \frac{gt^2}{2} . \qquad (5)$$

Мы видим, что тело как бы совершает одновременно два вида движения: вдоль оси x оно движется *равномерно*, а вдоль оси y — *равноускоренно без начальной скорости*.

На рисунке 11.2 показано положение тела через равные промежутки времени. Внизу показано положение в те же моменты времени тела, движущегося прямолинейно равномерно с той же начальной скоростью, а слева — положение свободно падающего тела.

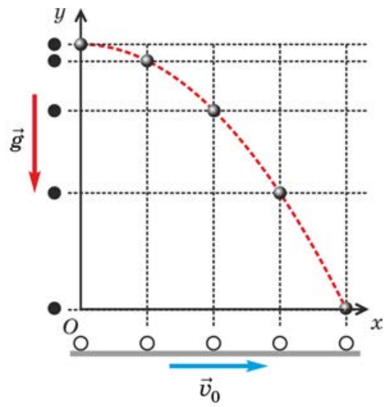


Рис. 11.2

Мы видим, что брошенное горизонтально тело находится всё время на одной вертикали с движущимся равномерно телом и на одной горизонтали со свободно падающим телом.

? **2.** Объясните, как из формул (4) и (5) получаются выражения для времени $t_{\text{пол}}$ и дальности полёта тела l :

$$t_{\text{пол}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} , \qquad (6)$$

$$l = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}} . \qquad (7)$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что в момент падения $y = 0$.

? **3.** Тело бросают горизонтально с некоторой высоты. В каком случае дальность полёта тела будет больше: при увеличении в 4 раза начальной скорости или при увеличении во столько же раз начальной высоты? Во сколько раз больше?

Траектория движения

На рисунке 8.2 траектория движения тела, брошенного горизонтально, изображена красной штриховой линией. Она напоминает ветвь параболы. Проверим это предположение.

? **4.** Докажите, что для тела, брошенного горизонтально, *уравнение траектории* движения, то есть зависимость $y(x)$ выражается формулой

$$y = h - \frac{gx^2}{2v_0^2} . \qquad (8)$$

Подсказка. Используя формулу (4), выразите t через x и подставьте найденное выражение в формулу (5).

Формула (8) действительно представляет собой *уравнение параболы*. Её вершина совпадает с начальным положением тела, то есть имеет координаты $x = 0$; $y = h$, а ветвь параболы направлена вниз (на это указывает отрицательный коэффициент перед x^2).

? **5.** Зависимость $y(x)$ выражается в единицах СИ формулой $y = 45 - 0{,}05x^2$.

а) Чему равны начальная высота и начальная скорость тела?

б) Чему равны время и дальность полёта?

? **6.** Тело брошено горизонтально с высоты 20 м с начальной скоростью 5 м/с.

а) Сколько времени будет длиться полёт тела?
б) Чему равна дальность полёта?
в) Чему равна скорость тела непосредственно перед ударом о землю?
г) Под каким углом к горизонту будет направлена скорость тела непосредственно перед ударом о землю?
д) Какой формулой в единицах СИ выражается зависимость модуля скорости тела от времени?

2. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

На рисунке 11.3 схематически изображено начальное положение тела, его начальная скорость $\vec{v}_0$ (при $t = 0$) и ускорение (ускорение свободного падения $\vec{g}$).

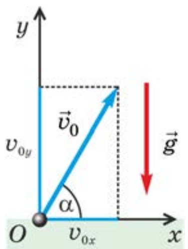


Рис. 11.3

Проекции начальной скорости

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha\,, \qquad (9)$$

$$v_{0y} = v_0 \sin\alpha\,. \qquad (10)$$

Для сокращения последующих записей и прояснения их физического смысла удобно до получения окончательных формул сохранять обозначения v_{0x} и v_{0y} .

Скорость $\vec{v}$ тела в векторном виде в момент времени t и в этом случае выражается формулой

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

Однако теперь в проекциях на оси координат:

$$v_x = v_{0x}\,, \qquad (11)$$

$$v_y = v_{0y} - gt \qquad (12)$$

? **7.** Объясните, как получаются следующие уравнения:

$$x = v_{0x}t\,, \qquad (13)$$

$$y = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}\,. \qquad (14)$$

Мы видим, что и в этом случае брошенное тело как бы участвует одновременно в двух видах движения: вдоль оси x оно движется *равномерно*, а вдоль оси y — *равноускоренно с начальной скоростью*, как тело, брошенное вертикально вверх.

Траектория движения

На рисунке 11.4 схематически показано положение тела, брошенного под углом к горизонту, через равные промежутки времени. Вертикальные линии подчёркивают, что вдоль оси x тело движется равномерно: соседние линии находятся на равных расстояниях друг от друга.

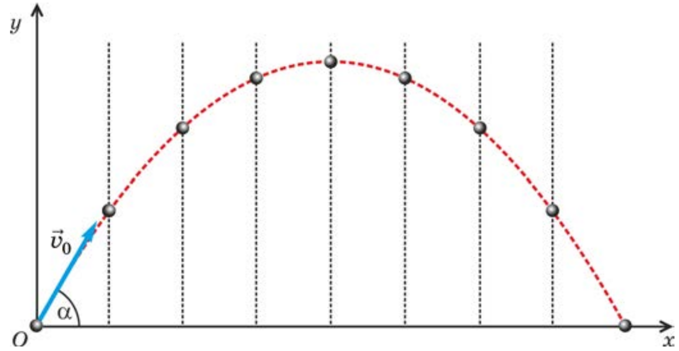


Рис. 11.4

? **8.** Объясните, как получить следующее *уравнение траектории* тела, брошенного под углом к горизонту

$$y = \frac{v_{0y}}{v_{0x}}x - \frac{gx^2}{2v_{0x}^2}\,. \qquad (15)$$

Формула (15) представляет собой уравнение параболы, ветви которой направлены вниз.

Уравнение траектории может многое рассказать нам о движении брошенного тела!

? **9.** Зависимость $y(x)$ выражается в единицах СИ формулой $y = \sqrt{3}\cdot x - 1,25x^2$.

а) Чему равна горизонтальная проекция начальной скорости?
б) Чему равна вертикальная проекция начальной скорости?
в) Под каким углом к горизонту брошено тело?
г) Чему равна начальная скорость тела?

Параболическую форму траектории тела, брошенного под углом к горизонту, наглядно демонстрирует струя воды (рис. 11.5).

Рис. 11.5

Время подъёма и время всего полёта

❓ **10.** Используя формулы (12) и (14), покажите, что время подъёма тела $t_{\text{под}}$ и время всего полёта $t_{\text{пол}}$ выражаются формулами

$$t_{\text{под}} = \frac{v_{0y}}{g}, \qquad (16)$$

$$t_{\text{пол}} = 2\frac{v_{0y}}{g}. \qquad (17)$$

Подсказка. В верхней точке траектории $v_y = 0$, а в момент падения тела его координата $y = 0$.

Мы видим, что и в этом случае (так же, как для тела, брошенного вертикально вверх) всё время полёта $t_{\text{пол}}$ в 2 раза больше времени подъёма $t_{\text{под}}$. И в этом случае при обратном просмотре видеосъёмки подъём тела будет выглядеть в точности как его спуск, а спуск — как подъём.

Высота и дальность полёта

❓ **11.** Докажите, что подъёма h и дальность полёта l выражаются формулами:

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2g}, \qquad (18)$$

$$l = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g}. \qquad (19)$$

Подсказка. Для вывода формулы (18) воспользуйтесь формулами (14) и (16) или формулой (10) из § 6. *Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении*; для вывода формулы (19) воспользуйтесь формулами (13) и (17).

Обратите внимание: время подъёма тела $t_{\text{под}}$, всё время полёта $t_{\text{пол}}$ и высота подъёма h зависят только от *вертикальной* проекции начальной скорости.

❓ **12.** До какой высоты поднялся после удара футбольный мяч, если он упал на землю через 4 с после удара?

❓ **13.** Докажите, что:

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}, \qquad (20)$$

$$l = \frac{2v_0^2 \sin\alpha \cos\alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}. \qquad (21)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (9), (10), (18), (19).

❓ **14.** Объясните, почему при одной и той же начальной скорости v_0 дальность полёта l будет одинакова при двух углах α_1 и α_2, связанных соотношением $\alpha_1 + \alpha_2 = 90°$ (рис. 11.6).

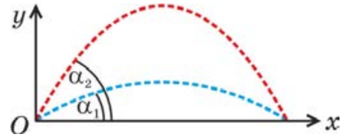


Рис. 11.6

Подсказка. Воспользуйтесь первым равенством в формуле (21) и тем, что $\sin\alpha = \cos(90° - \alpha)$.

❓ **15.** Два тела, брошенные одновременно из одной точки с одинаковой по модулю начальной скоростью, упали в одну точку. Угол между начальными скоростями равен 20°. Под какими углами к горизонту были брошены тела?

Максимальные дальность и высота полёта

При одной и той же по модулю начальной скорости дальность полёта и высота определяются только углом α. Как выбрать этот угол, чтобы дальность или высота полёта были максимальными?

❓ **16.** Объясните, почему максимальная дальность полёта достигается при $\alpha = 45°$ и выражается формулой

$$l_{\max} = \frac{v_0^2}{g}. \qquad (22)$$

❓ **17.** Докажите, что максимальная высота полёта выражается формулой

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}. \qquad (23)$$

? **18.** Тело, брошенное под углом 15° к горизонту, упало на расстоянии 5 м от начальной точки.

а) Чему равна начальная скорость тела?
б) До какой высоты поднялось тело?
в) Чему равна максимальная дальность полёта при той же по модулю начальной скорости?
г) До какой максимальной высоты могло бы подняться это тело при той же по модулю начальной скорости?

Зависимость скорости от времени

При подъёме скорость брошенного под углом к горизонту тела уменьшается по модулю, а при спуске — увеличивается.

? **19.** Тело брошено под углом 30° к горизонту с начальной скоростью 10 м/с.

а) Как в единицах СИ выражается зависимость $v_y(t)$?
б) Как в единицах СИ выражается зависимость $v(t)$?
в) Чему равна минимальная скорость тела во время полёта?

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (13) и (14), а также теоремой Пифагора.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

20. Бросая камешки под разными углами, Саша обнаружил, что не может бросить камешек дальше, чем на 40 м. На какую максимальную высоту Саша сможет забросить камешек?

21. Между сдвоенными шинами заднего колеса грузовика застрял камешек. На каком расстоянии от грузовика должен ехать следующий за ним автомобиль, чтобы этот камешек, сорвавшись, не причинил ему вреда? Оба автомобиля едут со скоростью 90 км/ч.
Подсказка. Перейдите в систему отсчёта, связанную с любым из автомобилей.

22. Под каким углом к горизонту надо бросить тело, чтобы:
а) высота полёта была равна дальности?
б) высота полёта была в 3 раза больше дальности?
в) дальность полёта была в 4 раза больше высоты?

23. Тело брошено с начальной скоростью 20 м/с под углом 60° к горизонту. Через какие промежутки времени после броска скорость тела будет направлена под углом 45° к горизонту?

§ 12. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ БРОШЕННЫХ ТЕЛ. ОТСКОК ОТ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

1. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ БРОШЕННЫХ ТЕЛ

Пусть в некоторый момент ($t = 0$) из точки A на высоте h начинает падать яблоко (рис. 12.1). Лежащий на траве юный стрелок в тот же момент стреляет из пружинного пистолета, намереваясь попасть «в яблочко». Пистолет находится в точке B на расстоянии d от вертикали, вдоль которой падает яблоко, а скорость пули по модулю равна v_0.

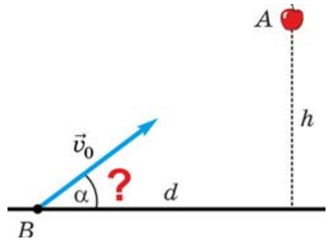


Рис. 12.1

1) Под каким углом α к горизонту надо направить пулю?
2) В какой момент времени пуля попадёт в яблоко?

Найдём сначала ответы на эти вопросы уже знакомым нам способом. Введём систему координат с началом в точке B, ось x направим по горизонтали вправо, а ось y — вверх. Запишем, как зависят от времени координаты пули и яблока и учтём, что в момент попадания пули в яблоко их координаты совпадают.

? **1.** Объясните, почему пуля может попасть в яблоко при условии, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{d}. \qquad (1)$$

Эта удивительно простая формула утверждает, что целиться надо *точно в яблочко* — так, будто ни пуля, ни яблоко не чувствуют притяжения Земли! Для того чтобы пуля попала в яблоко, значение имеет (казалось бы) только *направление* её начальной скорости.

? **2.** Объясните, почему до попадания пули в яблоко они будут двигаться в течение времени

$$t = \frac{AB}{v_0}. \qquad (2)$$

Здесь $AB = \sqrt{d^2 + h^2}$ — расстояние между пулей и яблоком в начальный момент.

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что $t = \dfrac{d}{v_{0x}} = \dfrac{d}{v_0 \cos\alpha}$.

Формула (2) тоже замечательна своей простотой: как будто бы яблоко и правда замерло на месте в ожидании пули, а пуля летела к яблоку, не чувствуя земного притяжения!

Найдём теперь физическую разгадку этой «простоты» и покажем, как можно было найти угол α и время полёта устно.

Поскольку яблоко и пуля движутся с ускорением свободного падения $\vec{g}$, их скорости в момент времени t в векторном виде выражаются формулами:

$$\vec{v}_{я} = \vec{g}t,$$

$$\vec{v}_{п} = \vec{v}_0 + \vec{g}t.$$

Перейдём в систему отсчёта, связанную с яблоком. Скорость яблока в этой системе отсчёта остаётся равной нулю, а скорость пули относительно яблока

$$\vec{v}_{пя} = \vec{v}_{п} - \vec{v}_{я} = \vec{v}_0 + \vec{g}t - \vec{g}t = \vec{v}_0.$$

Итак, до попадания в яблоко пуля движется относительно яблока с *постоянной* скоростью $\vec{v}_0$, то есть *прямолинейно* и *равномерно*!

Вот почему целиться надо «точно в яблочко» и вот почему время полёта пули до попадания в яблоко равно начальному расстоянию между ними, делённому на начальную скорость пули! Мы видим, что полученные выше формулы (1), (2) можно было записать сразу, без вычислений.

Остаётся проверить: действительно ли модуль начальной скорости пули не имеет значения для попадания в яблоко?

? **3.** При какой начальной скорости пули она *может* попасть в яблоко?

Подсказка. Время полёта пули до попадания в яблоко должно быть меньше времени падения яблока на землю.

Докажем, что тела, брошенные под *любыми* углами к горизонту с *любыми* начальными скоростями, движутся *друг относительно друга* с *постоянной* (по модулю и по направлению) скоростью, то есть *прямолинейно равномерно*.

Действительно, пусть начальные скорости двух тел равны $\vec{v}_{01}$ и $\vec{v}_{02}$. Тогда их скорости в момент времени t выражаются в векторном виде формулами

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_{01} + \vec{g}t,$$

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_{02} + \vec{g}t.$$

Скорость второго тела относительно первого

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = (\vec{v}_{02} + \vec{g}t) - (\vec{v}_{01} + \vec{g}t) = \vec{v}_{02} - \vec{v}_{01}.$$

Эта формула показывает, что относительная скорость тел *не зависит от времени*, то есть тела движутся друг относительно друга с *постоянной* скоростью.

Свидетелями этого интересного явления мы становимся, наблюдая во время фейерверков за разноцветными огненными шарами (рис. 12.2).

Рис. 12.2

Они имеют форму *шаров* именно потому, что образующие их светящиеся ракеты движутся друг относительно друга с *постоянными* скоростями!

Знание «секрета» относительного движения брошенных тел позволяет легко решать задачи, кажущиеся на первый взгляд довольно трудными.

? **4.** Из одной точки одновременно бросили два тела — первое под углом $15°$ к горизонту, а второе — под углом $75°$ к горизонту. Начальная скорость каждого тела 20 м/с. Траектории тел лежат в одной плоскости. Попробуйте на все следующие вопросы (кроме *а*) ответить *устно*.

а) Изобразите на одном чертеже начальные скорости тел и найдите начальную скорость второго тела относительно первого. Чему она равна по модулю?

б) Будет ли эта относительная скорость изменяться во время полёта тел?

в) Какой формулой в единицах СИ выражается зависимость расстояния d между телами во время полёта?

г) Через какой промежуток времени после броска расстояние между движущимися телами стало равным 10 м?

д) Объясните, почему эти тела не могут столкнуться в полёте.

2. ОТСКОК МЯЧА ОТ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Мяч свободно падает без начальной скорости с высоты h на наклонную плоскость с углом наклона α, отскакивает от неё и затем снова ударяется о плоскость (рис. 12.3).

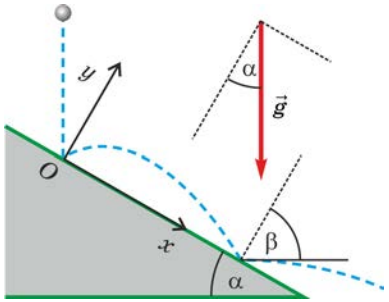


Рис. 12.3

Будем считать, что в результате столкновения мяча с плоскостью модуль скорости мяча не изменяется, а угол отражения равен углу падения[1].

Выясним:

1) чему равен промежуток времени τ между ударами?

2) чему равно расстояние d между точками ударов?

Обычно при рассмотрении ситуаций, в которых речь идёт о наклонной плоскости, удобно направить ось x параллельно наклонной плоскости вниз, а ось y — перпендикулярно наклонной плоскости вверх (рис. 12.3).

Обозначим $\vec{v}_0$ скорость мяча непосредственно перед первым ударом о плоскость, а $\vec{v}_1$ — скорость сразу после удара. Угол отражения мяча от наклонной плоскости после первого удара равен α, а угол отражения после второго удара мы обозначим β (мы его тоже найдём).

? **5.** Объясните, почему зависимость проекций скорости мяча от времени между ударами задаётся уравнениями

$$v_x = v_{x1} + g_x t = (v_0 + gt)\sin\alpha\,,$$

$$v_y = v_{y1} + g_y t = (v_0 - gt)\cos\alpha\,.$$

[1] Углы падения и отражения — это углы между скоростью мяча и *перпендикуляром* к наклонной плоскости непосредственно *перед* ударом мяча о плоскость и после удара.

? **6.** Объясните, почему зависимость координат мяча от времени между ударами задаётся уравнениями

$$x = v_{x1}t + \frac{g_x t^2}{2} = \left(v_0 + \frac{gt}{2}\right)t\sin\alpha\,;$$

$$y = v_{y1}t + \frac{g_y t^2}{2} = \left(v_0 - \frac{gt}{2}\right)t\cos\alpha\,.$$

? **7.** Получите формулу для промежутка времени τ между первым и вторым ударами мяча о плоскость:

$$\tau = 2\frac{v_0}{g}\,.$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что при ударе мяча о плоскость координата мяча $y = 0$.

Итак, промежуток времени между ударами *не зависит от угла наклона плоскости* α! Он определяется только модулем скорости в момент падения мяча, то есть начальной высотой h.

? **8.** Выразите расстояние d между точками первых двух ударов мяча о плоскость через v_0, α и g.

? **9.** Объясните, почему расстояние между точками второго и третьего ударов мяча о плоскость равно $2d$.

? **10.** Расстояния между точками последовательных ударов мяча о плоскость относятся как 1:2:3:4... Объясните, как получается это отношение.

Найдём соотношение между углом наклона плоскости α и углом β отражения мяча после второго удара (рис. 12.3).

Для этого надо найти проекции скорости мяча сразу после второго удара о плоскость.

? **11.** Объясните, почему проекции скорости мяча сразу после второго удара о плоскость выражаются формулами

$$v_x = 3v_0\sin\alpha\,,$$

$$v_y = v_0\cos\alpha\,.$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что в результате удара о плоскость проекция скорости мяча на ось x не изменяется, а проекция скорости на ось y изменяет знак, а также формулами зависимости проекций скорости мяча от времени и выражением для промежутка времени τ между двумя ударами.

Глава 2. ДИНАМИКА

§ 13. ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА

Раздел механики, в котором изучают, как взаимодействие тел влияет на их движение, называют *динамикой*.

Основные законы динамики открыли итальянский ученый Галилео Галилей и английский ученый Исаак Ньютон. Вы изучали эти законы в курсе физики основной школы. Напомним их.

Галилео Галилей
(1564–1642)

Исаак Ньютон
(1643–1727)

1. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА (ЗАКОН ИНЕРЦИИ)

Повторим один из опытов, которые поставил итальянский ученый Галилео Галилей.

Поставим опыт

Будем скатывать шар по наклонной плоскости и наблюдать за его дальнейшим движением по горизонтальной поверхности.

Если она посыпана песком, шар остановится очень скоро (рис. 13.1, *а*).

Если она покрыта тканью, шар катится значительно дольше (рис. 13.1, *б*).

А вот по стеклу шар катится очень долго (рис. 13.1, в).

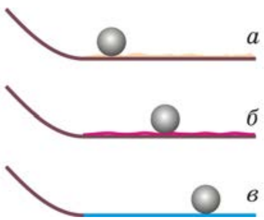


Рис. 13.1

На основании этого и подобных опытов Галилей открыл *закон инерции*: *если на тело не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы, то тело движется равномерно и прямолинейно или покоится*.

Сохранение скорости тела, когда на него не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы, называют *явлением инерции*.

? **1.** Почему при встряхивании мокрого зонта с него слетают капли воды?

Особенно красиво смотрится явление инерции в фигурном катании (рис. 13.2).

Рис. 13.2

Закон инерции называют также *первым законом Ньютона*, потому что Ньютон включил его в качестве первого закона в систему трех законов динамики, которые называют «тремя законами Ньютона».

Инерциальные системы отсчета

Закон инерции выполняется с хорошей точностью в системе отсчёта, связанной с Землёй. Но он не выполняется, например, в системе отсчёта, связанной с тормозящим автобусом: при резком торможении пассажиры отклоняются вперёд, хотя на них не действуют направленные вперёд силы.

Системы отсчёта, в которых выполняется закон инерции, называют *инерциальными*.

Инерциальных систем отсчёта *бесконечно много*. Ведь если некоторая система отсчёта является инерциальной, то инерциальной будет любая другая система отсчёта, движущаяся относительно неё прямолинейно и равномерно.

Сформулируем теперь *первый закон Ньютона* с указанием систем отсчёта, в которых он выполняется.

Существуют системы отсчета (называемые инерциальными), относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.

Изучать влияние взаимодействия тел на их движение удобнее всего именно в *инерциальных* системах отсчёта, потому что в этих системах отсчёта *изменение скорости тела обусловлено только действием других тел на это тело*.

Принцип относительности Галилея.

Как показывает опыт, *во всех инерциальных системах отсчёта все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях*.

Это утверждение называют *принципом относительности Галилея*.

В справедливости принципа относительности Галилея легко убедиться, сидя в поезде, который плавно движется с постоянной скоростью. В таком случае все опыты с механическими явлениями, поставленные *в вагоне*, дадут *одинаковые* результаты *независимо от того, едет поезд или стоит*: например, лежащее на столе яблоко будет покоиться, а свободно падающие предметы будут падать вертикально вниз (*относительно вагона*!).

Рис. 13.3

Поэтому пассажир может определить, едет поезд или стоит на станции, только посмотрев в окно (рис. 13.3).

2. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Равнодействующая

Как вы уже знаете из курса физики основной школы, силы — *векторные* величины: каждая сила характеризуется числовым значением (*модулем*) и *направлением*. Силы измеряют с помощью *динамометров*. Единицей силы в СИ является 1 *ньютон* (Н). Определение ньютона мы дадим позже.

Если на тело, которое можно считать материальной точкой, действуют несколько сил, то их можно заменить *одной* силой, которая является *векторной суммой этих сил*. Ее называют *равнодействующей*.

На рисунке 13.4 показано, как найти равнодействующую двух сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 . \qquad (1)$$

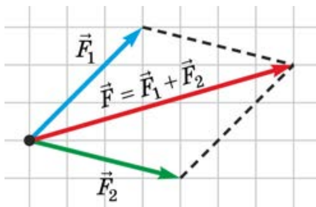


Рис. 13.4

? **2.** К телу приложены две силы, равные по модулю 1 Н и 2 Н. Отвечая на следующие вопросы, сделайте пояснительные чертежи.

а) Какое наименьшее значение может принимать равнодействующая этих сил? Как направлены силы в этом случае?

б) Какое наибольшее значение может быть у равнодействующей этих сил? Как направлены силы в этом случае?

в) Может ли равнодействующая этих сил быть равной 2 Н?

? **3.** К телу приложены две силы, равные по модулю 3 Н и 4 Н. Может ли их равнодействующая быть равной 5 Н? Если да, то чему в этом случае равен угол между приложенными силами?

? **4.** К телу приложены три равные по модулю силы по 1 Н каждая. Как они должны быть направлены, чтобы:

а) равнодействующая была равна 1 Н?

б) равнодействующая была равна нулю?

в) равнодействующая была равна 2 Н?

Масса тела

В курсе физики основной школы рассказывалось также об опытах, которые доказывают, что *под действием постоянной силы тело движется с постоянным ускорением*.

Коэффициент пропорциональности между силой и ускорением характеризует инертные свойства тела и называется *массой* тела. Чем больше масса тела, тем бóльшую силу надо приложить к телу, чтобы сообщить ему то же ускорение.

Единицей массы в СИ является 1 *килограмм* (кг). Это масса эталона, хранящегося в Международном бюро мер и весов (Франция). Приближённо можно считать, что одному килограмму равна масса 1 л воды .

Обозначают массу буквой m.

Второй закон Ньютона

Соотношение между равнодействующей всех сил, приложенных к телу, массой тела и его ускорением Ньютон сформулировал как *второй* из трёх основных законов механики:

Равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \qquad (2)$$

В инерциальной системе отсчёта сила является причиной ускорения, поэтому второй закона Ньютона часто записывают так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} . \qquad (3)$$

? **2.** Оцените силы гравитационного притяжения двух человек, находящихся на расстоянии 10 м друг от друга.

Силы тяготения заметно проявляют себя только тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих тел имеет *огромную* массу — например, является звездой или планетой.

? **3.** Как изменится сила притяжения между двумя материальными точками, если расстояние между ними увеличить в 3 раза?

? **4.** Две материальные точки массой m каждая притягиваются с силой F. С какой силой притягиваются материальные точки массой $2m$ и $3m$, находящиеся на таком же расстоянии?

2. ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ ВОКРУГ СОЛНЦА

Расстояние от Солнца до любой планеты во много раз больше размеров Солнца и планеты. Поэтому при рассмотрении движения планет их можно считать материальными точками. Следовательно, сила притяжения планеты к Солнцу

$$F = G\frac{M_C m}{R^2}, \qquad (3)$$

где m — масса планеты, M_C — масса Солнца, R — расстояние от Солнца до планеты.

Будем считать, что планета движется вокруг Солнца равномерно по окружности. Тогда скорость движения планеты можно найти, если учесть, что ускорение планеты $a = \frac{v^2}{R}$ обусловлено действием силы F притяжения Солнца и тем, что согласно второму закону Ньютона $F = ma$.

? **5.** Докажите, что *скорость планеты*

$$v = \sqrt{\frac{GM_C}{R}}. \qquad (4)$$

Из этой формулы следует, что *чем больше радиус орбиты, тем меньше скорость планеты.*

? **6.** Радиус орбиты Сатурна примерно в 9 раз больше радиуса орбиты Земли. Найдите устно, чему примерно равна скорость Сатурна, если Земля движется по своей орбите со скоростью 30 км/с?

За время, равное одному периоду обращения T, планета, двигаясь со скоростью v, проходит путь, равный длине окружности радиуса R.

? **7.** Докажите, что период обращения планеты

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM_C}}. \qquad (5)$$

Из этой формулы следует, что *чем больше радиус орбиты, тем больше период обращения планеты.*

? **8.** Оцените период обращения Сатурна (в земных годах).

? **9.** Докажите, что для *всех* планет Солнечной системы

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM_C}{4\pi^2}. \qquad (6)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулой (5).

Из формулы (6) следует, что *для всех планет Солнечной системы отношение куба радиуса орбиты к квадрату периода обращения одинаково*. Эту закономерность (её называют *третьим законом Кеплера*) обнаружил немецкий ученый Иоганн Кеплер на основании результатов многолетних наблюдений датского астронома Тихо Браге.

3. УСЛОВИЯ ПРИМЕНИМОСТИ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Ньютон доказал, что формулу

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

для силы притяжения двух материальных точек можно применять также для:

— *однородных шаров и сфер* (R — расстояние между *центрами* шаров или сфер, рис. 14.2, *а*);

— *однородного шара (сферы) и материальной точки* (R — расстояние от центра шара (сферы) до материальной точки (рис. 14.2, *б*).

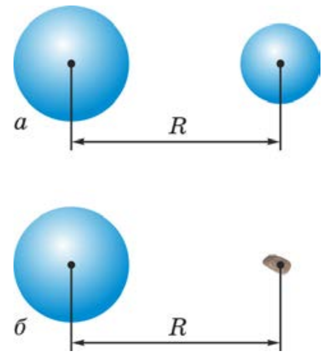


Рис. 14.2

? **5.** На рисунке 15.5 приведены графики зависимости модуля силы упругости от модуля деформации для трёх пружин.

а) У какой пружины наибольшая жёсткость?

б) Чему равна жёсткость самой мягкой пружины?

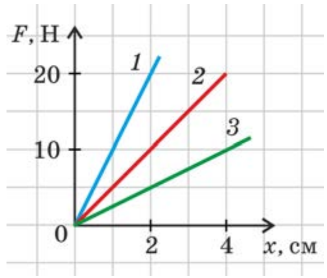


Рис. 15.5

? **6.** Груз какой массы надо подвесить к пружине жёсткостью 500 Н/м, чтобы удлинение пружины стало равным 3 см?

Важно отличать *удлинение* пружины x от её *длины* l. Различие между ними показывает формула (1).

? **7.** Когда к пружине подвешен груз массой 2 кг, её *длина* равна 14 см, а когда подвешен груз массой 4 кг, длина пружины равна 16 см.

а) Чему равна жёсткость пружины?

б) Чему равна длина недеформированной пружины?

3. СОЕДИНЕНИЕ ПРУЖИН

Последовательное соединение

Возьмём одну пружину жесткостью k (рис. 15.6, *а*). Если растягивать её силой $\vec{F}$ (рис. 15.6, *б*), её удлинение выражается формулой

$$x = \frac{F}{k}.$$

Возьмём теперь вторую такую же пружину и соединим пружины, как показано на рисунке 15.6, *в*. В таком случае говорят, что пружины соединены *последовательно*.

Найдём жесткость $k_{\text{посл}}$ системы из двух последовательно соединённых пружин.

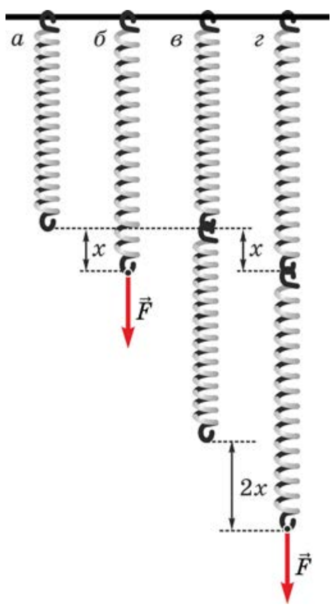


Рис. 15.6

Если растягивать систему пружин силой $\vec{F}$, то сила упругости *каждой* пружины будет равна по модулю F. Общее же удлинение системы пружин будет равно $2x$, потому что каждая пружина удлинится на x (рис. 15.6, *г*).

Следовательно,

$$k_{\text{посл}} = \frac{F}{2x} = \frac{1}{2}\frac{F}{x} = \frac{k}{2},$$

где k — жёсткость одной пружины.

Итак, *жёсткость системы из двух одинаковых последовательно соединённых пружин в 2 раза меньше, чем жёсткость каждой из них*.

Если последовательно соединить пружины с *разной* жёсткостью, то силы упругости пружин будут одинаковы. А общее удлинение системы пружин равно сумме удлинений пружин, каждое из которых можно рассчитать с помощью закона Гука.

? **8.** Докажите, что при последовательном соединении двух пружин

$$\frac{1}{k_{\text{посл}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}, \qquad (4)$$

где k_1 и k_2 — жёсткости пружин.

? **9.** Чему равна жёсткость системы двух последовательно соединенных пружин жёсткостью 200 Н/м и 50 Н/м?

В этом примере жёсткость системы двух последовательно соединённых пружин оказалась *меньше*, чем жёсткость *каждой* пружины. Всегда ли это так?

? **10.** Докажите, что жёсткость системы двух последовательно соединённых пружин *меньше* жёсткости *любой* из пружин, образующих систему.

Параллельное соединение

На рисунке 15.7 слева изображены *параллельно* соединённые одинаковые пружины.

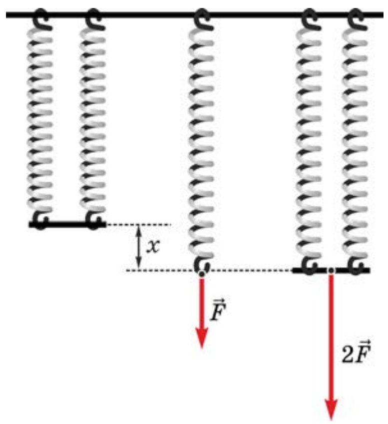


Рис. 15.7

? **2.** Через 2 с после начала движения с постоянным ускорением скорость лифта стала равной 6 м/с. В лифте на весах стоит пассажир массой 60 кг. Каковы во время разгона лифта показания весов (в кг), если лифт едет вверх? вниз?

? **3.** Лифт, двигавшийся со скоростью 4 м/с, начал тормозить. Во время торможения с постоянным ускорением вес находящегося в лифте человека массой 50 кг был равен 400 Н.
а) Куда направлено ускорение лифта?
б) Чему равно ускорение лифта?
в) Куда ехал лифт до остановки — вверх или вниз?

? **4.** Подвешенный на нити длиной 1 м груз массой 0,5 кг совершает колебания в вертикальной плоскости (рис. 16.2). В нижней точке скорость груза равна 2 м/с.
а) Как направлено в нижней точке ускорение груза?
б) Чему равно ускорение груза в нижней точке?
в) Чему равна сила натяжения нити в нижней точке?

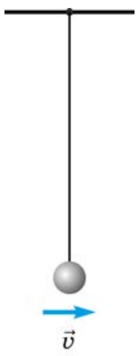


Рис. 16.2

? **5.** Автомобиль массой 1 т едет по выпуклому мосту, имеющему форму дуги окружности радиусом 40 м. Какой должна быть скорость автомобиля в верхней точке моста, чтобы в этой точке:
а) вес автомобиля был равен 2 кН?
б) автомобиль не давил на мост?

? **6.** К пружине жёсткостью 400 Н/м подвешивают груз массой 200 г, в результате чего пружина растягивается. Какова кратность перегрузки для груза в момент, когда удлинение пружины равно 2 см?

2. НЕВЕСОМОСТЬ

В предыдущем пункте была получена формула для веса тела находящегося на опоре, движущейся с ускорением $\vec{a}$, направленным вниз[1]:

$$P = m(g - a).$$

[1] Мы считаем, что модуль ускорения тела не превышает ускорения свободного падения.

Из этой формулы следует, что когда ускорение опоры приближается к ускорению свободного падения g, вес тела стремится к *нулю*.

При $a = g$ тело *совсем перестаёт давить на опору*. В этот момент *вес тела становится равным нулю*. Такое состояние называют *невесомостью*.

Итак, *тело находится в состоянии невесомости, когда оно под действием силы тяжести движется с ускорением свободного падения* $\vec{g}$. При этом оно не давит на опору и не растягивает подвес, поэтому их можно вообще убрать.

Однако находящееся в состоянии невесомости тело не обязательно должно падать *вниз*! Вспомним, что ускорение брошенного *произвольным образом* тела во время *всего полёта* равно ускорению свободного падения (если можно пренебречь сопротивлением воздуха). Следовательно, брошенное тело *находится в состоянии невесомости во время всего полёта*.

? **7.** Шарик брошен вертикально вверх. В какие моменты он находится в состоянии невесомости: при подъёме, в верхней точке траектории, или когда он падает вниз?

Чтобы испытать кратковременное состояние невесомости, достаточно просто подпрыгнуть (рис. 16.3).

Длительное состояние невесомости испытывают космонавты при *выключенных* двигателях космического корабля. При этом как корабль, так и космонавты находятся под действием *только силы тяжести*, то есть движутся с ускорением свободного падения.


Рис. 16.3

Поставим опыт

Нальём воду в пластиковую бутылку с отверстием в дне. Вода будет вытекать из отверстия. Но если бросить бутылку (*в любом направлении*), то во время полёта бутылки вода из неё не выливается! Дело в том, что бутылка и вода в ней находятся в *невесомости*: вода не давит на дно бутылки и поэтому не выливается.

§18. ПЛОТНОСТЬ ПЛАНЕТЫ. СУТОЧНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТЫ

1. ПЛОТНОСТЬ ПЛАНЕТЫ

Рассмотрим, как выразить ускорение свободного падения на поверхности планеты и первую космическую скорость для этой планеты через её радиус R и среднюю плотность[1] ρ.

? **1.** Выразите массу планеты M через её радиус R и среднюю плотность ρ.

? **2.** Чему равно ускорение свободного падения g на поверхности планеты радиуса R, имеющей среднюю плотность ρ?

Подсказка. Воспользуйтесь формулой (8) из § 14, заменив массу и радиус Земли на массу и радиус данной планеты.

? **3.** Вблизи поверхности планеты-гиганта Юпитер (на рисунке 18.1 Юпитер изображён в одном масштабе с Землёй) ускорение свободного падения в 2,6 раза больше, чем вблизи поверхности Земли. Радиус Юпитера примерно в 11 раз больше радиуса Земли. Какова средняя плотность Юпитера?

Рис. 18.1

? **4.** На планете радиусом 3400 км камень падает с обрыва высотой 200 м в течение 10 с. Чему равна средняя плотность планеты? Считайте, что сопротивлением атмосферы планеты можно пренебречь.

? **5.** Чему равна первая космическая скорость для планеты радиусом R и средней плотностью ρ?

Подсказка. Воспользуйтесь формулой (9) из § 14, заменив радиус Земли и ускорение свободного падения на поверхности Земли на массу данной планеты и ускорение свободного падения на её поверхности.

[1] Средняя плотность планеты равна отношению массы планеты к её объему.

А сейчас мы получим несколько неожиданный результат.

? **6.** Чему равен период T обращения спутника по низкой круговой орбите[1] вокруг планеты радиусом R и средней плотностью ρ?

Итак, период обращения спутника на низкой круговой орбите зависит *только* от средней плотности планеты!

? **7.** Астронавты облетели три планеты А, Б и В на низких круговых орбитах с *выключенным* двигателем. Время облёта каждой из планет составило: $T_А = 55$ мин, $T_Б = 106$ мин, $T_В = 72$ мин. У какой из этих планет наибольшая средняя плотность? У каких из этих планет средняя плотность больше средней плотности Земли? Напомним, что период обращения искусственного спутника Земли на низкой орбите 85 мин.

2. УЧЁТ ВРАЩЕНИЯ ПЛАНЕТЫ ВОКРУГ СВОЕЙ ОСИ

Геостационарная орбита

Телевизионные программы передают в разные точки Земли с помощью *спутников связи* (рис. 18.2), которые движутся по круговым орбитам.

Рис. 18.2

Сигнал со спутника принимает укрепленная на стене или крыше дома спутниковая антенна. Она направлена постоянно на *одну и ту же точку* небосвода, поэтому спутник связи должен постоянно «висеть» *над одной и той же точкой поверхности Земли*.

? **8.** Чему равен период одного оборота спутника связи?

Орбиту, по которой движется спутник, находящийся постоянно над одной и той же точкой поверхности Земли, называют *геостационарной*. Она лежит в экваториальной плоскости Земли (так называют плоскость, в которой лежит экватор).

[1] В таком случае радиус орбиты можно считать равным радиусу планеты.

? **9.** Выразите радиус $r_{гс}$ геостационарной орбиты через ускорение свободного падения g вблизи поверхности Земли, радиус Земли и продолжительность суток T.

Подсказка. Запишите уравнение второго закона Ньютона для спутника связи, выразив в нём гравитационную постоянную G через g, $M_{Зем}$, $R_{Зем}$.

? **10.** Чему равен радиус геостационарной орбиты? На какой высоте над поверхностью Земли находится эта орбита?

Выполнив это задание, вы оцените уровень современной техники: спутниковая антенна устойчиво принимает сигнал с расстояния в *десятки тысяч километров*!

Вес тела на полюсе и на экваторе

Вследствие вращения планеты вокруг своей оси (его называют *суточным*) вес одного и того же тела на экваторе планеты *меньше*, чем на её полюсе. Выясним, от чего зависит разность значений веса на экваторе и на полюсе.

Пусть тело покоится на поверхности шарообразной планеты вблизи её полюса. В этом случае вес тела:

$$P_п = mg, \qquad (3)$$

где g — ускорение свободного падения.

Чтобы найти вес тела на поверхности планеты вблизи экватора, надо учесть суточное вращение планеты.

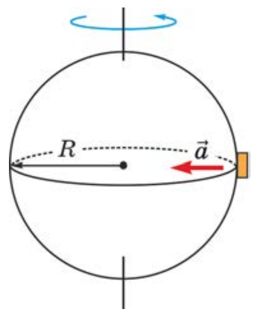


Рис. 18.3

Вследствие этого вращения находящееся на экваторе тело *равномерно движется по окружности* относительно инерциальной системы отсчёта, связанной с удаленными звездами (рис. 18.3). Радиус окружности равен радиусу планеты R, а период обращения T равен продолжительности суток.

Вследствие суточного вращения планеты находящееся на её экваторе тело движется относительно *инерциальной* системы отсчёта с центростремительным ускорением

$$a = \frac{4\pi^2}{T^2}R. \qquad (4)$$

Это ускорение направлено *к центру планеты*, то есть *вниз*. А если тело движется с ускорением $\vec{a}$, направленным вниз, вес этого тела выражается формулой (см. § 16):

$$P_э = m(g - a).$$

? **11.** Чему равно уменьшение веса тела массой m на экваторе шарообразной планеты радиусом R по сравнению с его весом на полюсе, если период обращения планеты равен T?

? **12.** С помощью каких весов можно обнаружить уменьшение веса тела на экваторе — *рычажных*, в которых используются гири, или *пружинных*, когда вес тела измеряют по удлинению пружины?

? **13.** Каково обусловленное суточным вращением Земли уменьшение веса корабля массой 40 000 т при переходе его из приполярной области в экваториальные воды? Уменьшается ли при этом масса корабля?

? **14.** На сколько процентов уменьшается вес тела вследствие суточного вращения Земли при перемещении его с полюса Земли на экватор?

Существует ещё одна причина уменьшения веса тела на экваторе Земли по сравнению с весом на полюсе.

Дело в том, что Земля немного сплюснута у полюсов — расстояние между Северным и Южным полюсами (по прямой сквозь Землю) примерно на 43 км меньше, чем расстояние между диаметрально противоположными точками экватора Земли. Вследствие этого на полюсе находящаяся на уровне моря точка расположена примерно на 21,5 км ближе к центру Земли, чем точка на экваторе.

Общее уменьшение веса, обусловленное суточным вращением и сплюснутостью Земли, составляет примерно 0,5 %.

? **15.** Каким должен быть период обращения шарообразной планеты массой M и радиусом r вокруг своей оси, чтобы находящиеся на её экваторе тела находились в состоянии невесомости?

? **16.** При какой продолжительности земных суток тела на земном экваторе были бы в состоянии невесомости?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

17. Сорвавшийся с обрыва на некоторой планете камень падал с высоты h в течение времени t. Радиус планеты равен R. Чему равна масса планеты M?

18. Высадившийся на планету радиуса R астронавт бросает камешки с начальной скоростью v_0 под разными углами к горизонту. Чему равна средняя плотность планеты, если все камешки упали на расстоянии от космонавта, не превышающем l?

19. Космонавты высадились на экваторе шарообразной малой планеты. Средняя плотность планеты ρ, радиус R, продолжительность суток T.

а) Чему равна скорость точек поверхности планеты на экваторе?

б) Чему равна первая космическая скорость для этой планеты?

в) С какой скоростью космонавты могут ехать на гусеничном вездеходе вдоль экватора по направлению суточного вращения планеты, не отрываясь от её поверхности?

20. Над находящейся на экваторе Земли африканской деревней 2 раза в сутки — в полдень и в полночь — пролетают одновременно два искусственных спутника, А и Б. Орбиты спутников лежат в экваториальной плоскости, спутник А движется на восток, а Б — на запад.

а) Какой спутник движется в направлении суточного вращения Земли, а какой — в противоположном?

б) Чему равен период обращения каждого спутника?

в) Каковы радиусы орбит спутников?

21. Космический корабль массой 10 т должен постоянно находиться в точке, где силы притяжения со стороны Земли и Луны уравновешивают друг друга. Примите, что Землю можно считать неподвижной, а расстояние от Земли до Луны постоянным.

а) Как направлена сила тяги двигателя корабля?

б) Выразите расстояние r от Земли до корабля через массу Земли $M_{\text{Зем}}$, массу Луны $M_{\text{Л}}$ и расстояние $R_{\text{ЗЛ}}$ от Земли до Луны.

в) Чему равна сила тяги двигателя корабля? 23 Н.

§ 19. ТЕЛО НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

1. ТЕЛО НА ГЛАДКОЙ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Напомним, что говоря о *гладкой* поверхности, подразумевают, что *трением между телом и этой поверхностью можно пренебречь*.

На тело массой m, находящееся на *гладкой* наклонной плоскости, действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила нормальной реакции $\vec{N}$ (рис. 19.1).

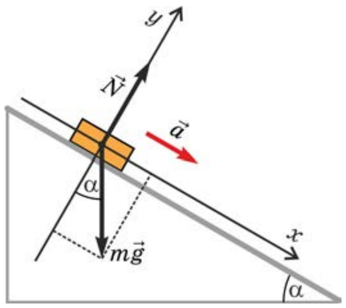


Рис. 19.1

Удобно ось x направить вдоль наклонной плоскости вниз, а ось y — перпендикулярно наклонной плоскости вверх (рис. 19.1). Угол наклона плоскости обозначим α.

Уравнение второго закона Ньютона в векторной форме имеет вид:

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}\,.$$

? **1.** Объясните, почему справедливы следующие уравнения:

$$\begin{cases} Ox: & mg\sin\alpha = ma_x \\ Oy: & -mg\cos\alpha + N = 0 \end{cases}$$

? **2.** Чему равна проекция ускорения тела на ось x?

? **3.** Чему равен модуль силы нормальной реакции?

? **4.** При каком угле наклона ускорение тела на гладкой плоскости в 2 раза меньше ускорения свободного падения?

? **5.** При каком угле наклона плоскости сила нормальной реакции в 2 раза меньше силы тяжести?

При выполнении следующего задания полезно заметить, что ускорение тела, находящегося на гладкой наклонной плоскости, *не зависит от направления начальной скорости тела*.

? **6.** Шайбу толкнули вверх вдоль гладкой наклонной плоскости с углом наклона α. Начальная скорость шайбы v_0.

а) Какой путь пройдёт шайба до остановки?
б) Через какой промежуток времени шайба вернётся в начальную точку?
в) С какой скоростью шайба вернётся в начальную точку?

? **7.** Брусок массой m находится на гладкой наклонной плоскости с углом наклона α. Чему равен модуль силы, удерживающей брусок на наклонной плоскости, если сила направлена:
а) вдоль наклонной плоскости?
б) горизонтально?
в) Чему равна сила нормальной реакции, когда сила направлена горизонтально?

2. УСЛОВИЕ ПОКОЯ ТЕЛА НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Будем теперь учитывать силу трения между телом и наклонной плоскостью.

Если тело *покоится* на наклонной плоскости, на него действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции $\vec{N}$ и сила трения *покоя* $\vec{F}_{\text{тр.пок}}$ (рис. 19.2).

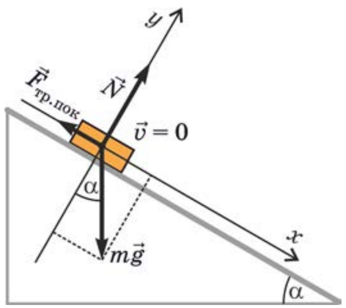


Рис. 19.2

Сила трения покоя *направлена вдоль наклонной плоскости вверх*: она препятствует соскальзыванию бруска. Следовательно, проекция этой силы на ось x, направленную вдоль наклонной плоскости вниз, *отрицательна*:

$$F_{\text{тр.пок}\,x} = -F_{\text{тр.пок}}.$$

? **8.** Объясните, почему справедливы следующие уравнения:

$$\begin{cases} Ox: \quad mg\sin\alpha - F_{\text{тр пок}} = 0 \\ Oy: \quad -mg\cos\alpha + N = 0 \end{cases}$$

? **9.** На наклонной плоскости с углом наклона α покоится брусок массой m. Коэффициент трения между брусом и плоскостью равен μ. Чему равна действующая на брусок сила трения? Есть ли в условии лишние данные?

? **10.** Объясните, почему условие покоя тела на наклонной плоскости выражается неравенством:

$$\mu \geq \operatorname{tg}\alpha.$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что сила трения покоя удовлетворяет *неравенству* $F_{\text{тр.пок}} \leq \mu N$.

Последнее неравенство можно использовать для *измерения коэффициента трения*: угол наклона плоскости плавно увеличивают, пока тело не начинает скользить по ней (см. лабораторную работу ***).

? **11.** Лежащий на доске брусок начал скользить по доске, когда её угол наклона к горизонту составил 20°. Чему равен коэффициент трения между бруском и доской?

? **12.** Кирпич массой 2,5 кг лежит на доске длиной 2 м. Коэффициент трения между кирпичом и доской равен 0,4.
а) На какую максимальную высоту можно поднять один конец доски, чтобы кирпич не сдвинулся?
б) Чему будет равна при этом действующая на кирпич сила трения?

Сила трения покоя, действующая на тело, находящееся на наклонной плоскости, не обязательно направлена вдоль плоскости *вверх*. Она может быть направлена и *вниз* вдоль плоскости!

? **13.** Брусок массой m находится на наклонной плоскости с углом наклона α. Коэффициент трения между бруском и плоскостью равен μ, причем $\mu < \operatorname{tg}\alpha$. Какую минимальную силу надо приложить к бруску вдоль наклонной плоскости, чтобы:
а) он находился в покое?
а) сдвинуть его вдоль наклонной плоскости вверх?

Подсказка. Когда брусок сдвигают вдоль наклонной плоскости вверх, действующая на него сила трения направлена вдоль наклонной плоскости *вниз*.

? **14.** Брусок массой m находится на наклонной плоскости с углом наклона α. Коэффициент трения между бруском и плоскостью равен μ, причем $\mu > \operatorname{tg}\alpha$. Какую силу надо приложить к бруску вдоль наклонной плоскости, чтобы сдвинуть его вдоль наклонной плоскости:
а) вниз? б) вверх?

чальный момент брусок покоится.

26. По гладкой наклонной плоскости с углом наклона α скатывается тележка. На тележке установлен штатив, на котором на нити подвешен груз. Сделайте чертёж, изобразите силы, действующие на груз. Под каким углом к вертикали расположена нить, когда груз покоится относительно тележки?

27. Брусок находится на вершине наклонной плоскости длиной 2 м и высотой 50 см. Коэффициент трения между бруском и плоскостью 0,3.
а) С каким по модулю ускорением будет двигаться брусок, если толкнуть его вниз вдоль плоскости?
б) Какую скорость надо сообщить бруску, чтобы он достиг основания плоскости?

28. Тело массой 2 кг находится на наклонной плоскости. Коэффициент трения между телом и плоскостью 0,4.
а) При каком угле наклона плоскости достигается наибольшее возможное значение силы трения?
б) Чему равно наибольшее значение силы трения?
в) Постройте примерный график зависимости силы трения от угла наклона плоскости.

Подсказка. Если $\operatorname{tg}\alpha \le \mu$, на тело действует сила трения покоя, а если $\operatorname{tg}\alpha > \mu$ – сила трения скольжения.

§ 20. ДВИЖЕНИЕ ПО ГОРИЗОНТАЛИ И ВЕРТИКАЛИ

1. ДВИЖЕНИЕ ПО ГОРИЗОНТАЛИ

Сила направлена горизонтально

Пусть к бруску массой m, находящемуся на столе[1], приложена горизонтально направленная сила[2] $\vec{F}$, а начальная скорость бруска $\vec{v}_0$ направлена в ту же сторону, что и сила $\vec{F}$ (рис. 20.1). Коэффициент трения между бруском и поверхностью обозначим μ.

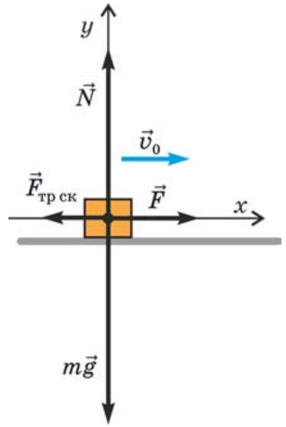


Рис. 20.1

Если тело *движется* относительно поверхности, с которой оно соприкасается, то на него действует сила трения *скольжения*.

Направим оси координат, как показано на рисунке 20.1.

? **1.** Объясните, почему справедливо уравнение

$$a_x = \frac{F}{m} - \mu g .$$

? **2.** Объясните, почему из уравнения (1) следует, что:
— при $F > \mu mg$ скорость тела увеличивается;
— при $F < \mu mg$ скорость тела уменьшается;
— при $F = \mu mg$ скорость тела не изменяется.

? **3.** К бруску массой 2 кг, движущемуся по столу с начальной скоростью 3 м/с, прикладывают горизонтальную силу, равную по модулю 4 Н и направленную так же, как начальная скорость бруска. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,3. Какой путь пройдет брусок за 4 с?

Рассмотрим теперь случай, когда начальная скорость бруска равна *нулю*.

---

[1] Здесь и далее будем подразумевать *горизонтальный* стол.
[2] Чтобы выбрать правильное соотношение сил на чертеже, учтите, что значение коэффициента трения заключено обычно в пределах 0,2–0,5. Поэтому модуль силы трения в несколько раз меньше модуля силы нормальной реакции.

Если начальная скорость тела равна нулю, то надо выяснить, *сдвинется ли оно с места*. Если тело не сдвинется, то на него будет действовать сила трения *покоя*, для которой *нельзя* пользоваться равенством $F = \mu N$.

4. Объясните, почему брусок не сдвинется с места, если

$$F \le \mu mg \,.$$

5. Объясните, почему действующая на неподвижный брусок сила трения равна

$$F_{тр} = F \,.$$

6. На столе покоится брусок массой 400 г. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,3. Чему будут равны ускорение бруска и действующая на него сила трения, если тянуть брусок горизонтальной силой, равной по модулю: 1 Н? 2 Н?

Сила направлена вверх под углом к горизонту

К бруску приложена сила $\vec{F}$, направленная вверх под углом α к горизонту (рис. 20.2). Начальная скорость бруска равна $\vec{v}_0$.

7. Используя рисунок 20.2, объясните смысл следующих уравнений:

$$\begin{cases} Ox: & -F_{тр\ ск} + F\cos\alpha = ma_x \\ Oy: & -mg + N + F\sin\alpha = 0 \end{cases}$$

8. К движущемуся по столу бруску массой 0,5 кг приложена сила, равная по модулю 2 Н. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,3. Чему равна проекция ускорения бруска на ось x, направленную по скорости бруска, если сила направлена вверх под углом к горизонту, равным:
а) 30°? б) 70 °?

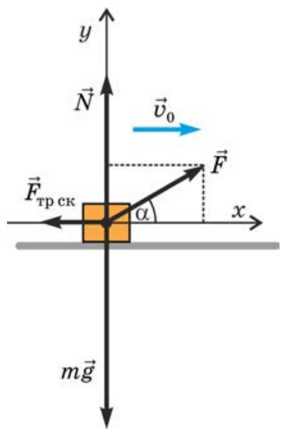


Рис. 20.2

9. Чему равны модуль силы нормальной реакции N и модуль силы F при *равномерном* перемещении

по столу бруска массой 2 кг, если коэффициент трения между бруском и столом равен 0,5, а сила направлена:
а) горизонтально?
б) вверх под углом к горизонту, равным 30°?
в) вверх под углом к горизонту, равным 70°?

Итак, когда сила $\vec{F}$ направлена горизонтально, $N = mg$, и $F = \mu mg$. Если же $\vec{F}$ направлена вверх под углом к горизонту, то $N < mg$ (сила $\vec{F}$ приподнимает груз), поэтому сила трения *уменьшается*. Казалось бы, что по этой причине *всегда* выполняется условие $F < \mu mg$. Однако это не так (случай *в* предыдущего задания). Ведь при увеличении угла, который составляет сила $\vec{F}$ с горизонтом, уменьшается горизонтальная проекция силы.

Пусть теперь сила $\vec{F}$ приложена к *покоящемуся* бруску.

10. Объясните, почему брусок сдвинется с места только при условии, что

$$F(\cos\alpha + \mu\sin\alpha) > \mu mg \,. \qquad (5)$$

11. К покоящемуся бруску массой 2кг приложена сила, равная по модулю 10 Н. Коэффициент трения между бруском и столом равен 0,5. Чему равно ускорение бруска, если сила направлена вверх под углом к горизонту, равным:
а) 30°? б) 60°?

12. Груз массой 10 кг покоится на столе. Коэффициент трения между грузом и столом равен 0,4. Чему будут равны ускорение бруска и действующая на него со стороны стола сила трения, если тянуть брусок силой, равной по модулю 40 Н и направленной вверх под углом 30° к горизонту? под углом 60° к горизонту?

Сила направлена вниз под углом к горизонту

Рассмотрим теперь случай, когда сила направлена *вниз* под углом к горизонту, то есть когда брусок не тянут, а *толкают*.

Пусть начальная скорость бруска равна $\vec{v}_0$ (рис. 20.3).

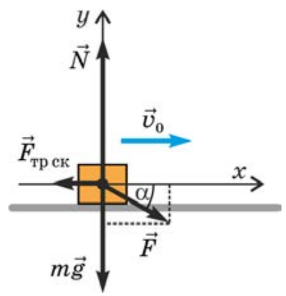


Рис. 20.3

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

22. Чтобы равномерно перемещать груз по столу, можно прикладывать либо силу 12 Н, направленную горизонтально, либо силу 11 Н, направленную вверх под углом 30° к горизонту. Чему равны:

а) коэффициент трения между грузом и столом?

б) масса груза?

в) Чему равна сила нормальной реакции опоры, когда сила направлена вверх под углом 30° к горизонту?

23. Дед Мороз тянет санки массой 10 кг, на которых лежит мешок с подарками массой 20 кг. Верёвка, привязанная к санкам, составляет угол 20° с горизонтом. Коэффициент трения между санками и снегом 0,2. Санки движутся равномерно со скоростью 1 м/с.

а) С какой силой Дед Мороз тянет верёвку?

б) С какой силой санки давят на снег?

в) Чему равна действующая на санки сила трения?

г) С каким ускорением будут двигаться санки, если мешок с подарками упадёт с них, а Дед Мороз будет продолжать тянуть верёвку с той же силой?

24. Чтобы равномерно перемещать тело по горизонтальной поверхности, прикладывая силу, направленную *вниз* под углом 60° к горизонту, надо чтобы сила была в 14 раз больше силы, направленной *вверх* под тем же углом к горизонту. Чему равен коэффициент трения?

25. Брусок массой 3 кг прижимают к стене силой 40 Н, направленной под углом 30° к вертикали. В начальный момент брусок покоится.

а) В каком направлении будет двигаться брусок?

б) Чему будет равно ускорение бруска, если коэффициент трения между бруском и стеной равен: 0,4? 0,15?

26. С какой наименьшей горизонтальной силой надо прижимать книгу массой 400 г ладонью к стене, чтобы книга покоилась? Коэффициент трения между книгой и стеной равен 0,2, а между книгой и ладонью равен 0,3.

Подсказка. Книга не начнёт скользить по стене, пока *каждая* из сил трения покоя, действующих на книгу (со стороны стены и ладони), не достигнет своего максимально возможного значения.

§ 21. ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

1. ПОВОРОТ ТРАНСПОРТА

Движение по горизонтальной дороге

Напомним, что ускорение тела $\vec{a}$, движущегося со скоростью v по окружности радиуса r, направлено к центру окружности (центростремительное ускорение). Модуль ускорения

$$a = \frac{v^2}{r}.$$

Согласно второму закону Ньютона

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

где $\vec{F}$ равнодействующая всех приложенных к телу сил.

Пусть автомобиль совершает поворот на горизонтальной дороге, двигаясь равномерно по дуге окружности. На него действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила нормальной реакции $\vec{N}$ (рис. 21.1). Но обе они направлены *вертикально* и поэтому не могут вызвать ускорения, направленного *горизонтально*. Это ускорение вызывает горизонтально направленная *сила трения*, действующая на автомобиль со стороны дороги.

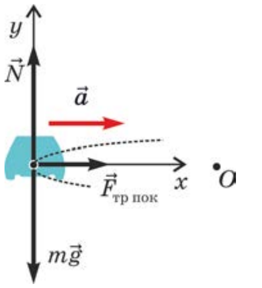


Рис. 21.1

Если колёса автомобиля не проскальзывают, то нижние точки колёс покоятся относительно дороги. Следовательно, ускорение вызывает[1] *сила трения покоя* $\vec{F}_{\text{тр.пок}}$ (рис. 21.1).

? **1.** Используя рисунок 21.1, объясните смысл следующих уравнений:

$$\begin{cases} Ox: \quad F_{\text{тр.пок}} = \dfrac{mv^2}{r} \\ Oy: \quad mg - N = 0 \end{cases}$$

[1] Эта сила возникает, когда вследствие поворота руля оси вращения передних колёс поворачиваются. Причины появления этой силы можно объяснить, только рассматривая автомобиль не как материальную точку.

? **2.** Чему равен радиус окружности r, по которой может равномерно двигаться автомобиль на горизонтальной дороге со скоростью v, если коэффициент трения между колесами и дорогой равен μ?

Подсказка. $F_{\text{тр.пок}} \le \mu N$.

? **3.** С какой наибольшей скоростью (в километрах в час) автомобиль может совершить поворот на перекрестке нешироких улиц, двигаясь по дуге окружности радиуса 10 м? Рассмотрите движение автомобиля по сухому асфальту и по льду.

Выполнив это задание, вы лучше поймёте, почему водитель притормаживает перед поворотом, особенно на скользкой дороге.

Движение по наклонной дороге

Если полотно дороги наклонить в сторону поворота, то сила нормальной реакции опоры будет наклонена под углом к вертикали (рис. 21.2).

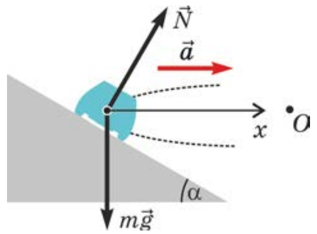


Рис. 21.2

В таком случае появляется горизонтальная составляющая силы нормальной реакции, направленная в сторону поворота. Это позволяет увеличить скорость на повороте при тех же значениях радиуса поворота и коэффициента трения.

? **4.** При каком угле наклона дороги автомобиль, едущий со скоростью v = 72 км/ч по дуге окружности радиуса r = 30 м может совершить поворот даже на очень скользкой дороге?

Подсказка. В данном случае проекция силы нормальной реакции на ось x равна $mg\,\mathrm{tg}\,\alpha$.

Оис. 21.3

? **5.** Почему велотреки делают с наклоном внутрь (рис. 21.3)?

Гонки по вертикальной стене

Ехать по окружности можно и по *вертикальной* стене (рис. 21.4)! В таком случае центростремительное ускорение обеспечивает только сила нормальной реакции[1] (рис. 21.5).

Рис. 21.4

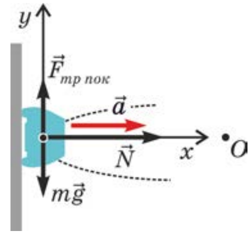


Рис. 21.5

? **6.** С какой скоростью (в километрах в час) можно ехать по вертикальной цилиндрической стене радиусом 5 м, если коэффициент трения μ между колёсами и стеной равен 0,5?

2. КОНИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Подвешенный на нити груз, который равномерно движется по окружности в горизонтальной плоскости, называют *коническим маятником* (рис. 21.6).

На груз действуют сила тяжести $m\vec g$ и сила натяжения[2] нити $\vec F$, направленная *вдоль нити*. Равнодействующая этих сил вызывает центростремительное ускорение груза.

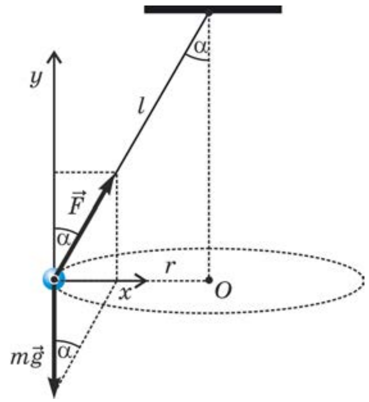


Рис. 21.6

Введём обозначения:

l — длина нити,
r — радиус окружности,
α — угол между нитью и вертикалью,
T — период обращения груза по окружности.

---

[1] Автомобиль, едущий по вертикальной стене, не переворачивается потому, что на его нижние колёса стена давит с большей силой, чем на верхние.

[2] Силу натяжения нити в данном случае неудобно обозначать $\vec T$, потому что буквой T обозначен период обращения груза по окружности.

? **7.** Используя рисунок 21.6, объясните смысл следующих уравнений:

$$\begin{cases} Ox: \quad F = m\dfrac{4\pi^2}{T^2}l \\ Oy: \quad F\cos\alpha - mg = 0 \end{cases}$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что $r = l\cos\alpha$.

? **8.** Чему равен период обращения конического маятника, если длина нити равна l?

? **9.** Шарик массой 100 г, подвешенный на нити длиной 50 см, вращается по окружности в горизонтальной плоскости. При этом сила натяжения нити 2 Н.

а) Какой угол составляет нить с вертикалью?

б) Чему равен период обращения шарика по окружности?

в) Чему равен радиус окружности, по которой движется шарик?

г) С какой скоростью движется шарик?

д) Во сколько раз ускорение шарика больше ускорения свободного падения?

е) За какое время шарик пройдет путь, равный 1 км?

Движение по гладкой поверхности

Пусть небольшая шайба скользит по горизонтальной окружности внутри *гладкой* полусферы (рис. 21.7).

Главное в таких задачах — увидеть, что это *видоизмененный конический маятник*: роль силы натяжения нити играет сила нормальной реакции.

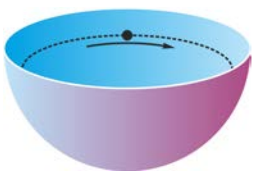


Рис. 21.7

? **10.** Шайба массой 50 г движется со скоростью 2 м/с по горизонтальной окружности радиусом 20 см внутри гладкой полусферы.

а) С каким ускорением движется шайба?

б) Под каким углом к вертикали направлена сила нормальной реакции, действующая на шайбу со стороны полусферы?

в) Чему равна сила нормального давления?

г) Чему равен радиус полусферы?

д) Чему равна частота обращения шайбы по окружности?

Рассмотрим также движение тела по внутренней поверхности конуса.

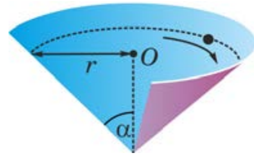


Рис. 21.8

? **11.** Шайба движется по горизонтальной окружности радиуса r по гладкой поверхности конуса (рис. 21.8, для наглядности конус разрезан). Образующая конуса составляет угол α с вертикалью. Чему равен период обращения шайбы?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

12. На горизонтальном диске на расстоянии 10 см от оси лежит небольшая шайба массой 20 г. Диск начинают вращать вокруг его оси, медленно увеличивая частоту обращения. Когда частота становится равной 1 $с^{-1}$, шайба начинает скользить по диску.

а) Каков коэффициент трения между шайбой и диском?

б) Чему равна сила трения, действующая на шайбу, при частоте обращения 0,5 $с^{-1}$?

в) Начертите примерный график зависимости силы трения от частоты обращения диска.

13. Груз массой 100 г, подвешенный на пружине жёсткостью 200 Н/м, вращают по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости. Чему равна частота обращения, если длина пружины в 2 раза больше её длины в недеформированном состоянии?

14. На стержне, укреплённом на расстоянии d от оси вращения горизонтального диска, на нити длиной l подвешен шарик (рис. 21.9). При вращении диска нить отклоняется от вертикали на угол α.

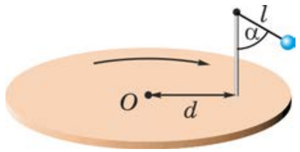


Рис. 21.9

а) Каково ускорение шарика?

б) Каков период обращения диска?

§ 22. ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ ТЕЛ БЕЗ УЧЁТА ТРЕНИЯ

1. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Пусть по *гладкому* столу под действием горизонтальной силы $\vec{F}$ движутся бруски массой m_1 и m_2, связанные *лёгкой нерастяжимой* нитью (рис. 22.1).

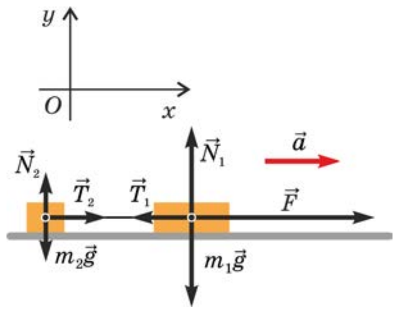


Рис. 22.1

? **1.** Используя рисунок 22.1, объясните смысл следующих уравнений:

$$m_1\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{T}_1 + \vec{F} = m_1\vec{a}_1. \quad (1)$$

$$m_2\vec{g} + \vec{N}_2 + \vec{T}_2 = m_2\vec{a}_2. \quad (2)$$

Указание на то, что нить *лёгкая*, означает, что *массой нити можно пренебречь*. В таком случае равнодействующую приложенных к нити сил надо считать равной *нулю* (иначе нить получила бы бесконечно большое ускорение). Значит, бруски тянут нить в противоположные стороны с *равными* по модулю силами. Тогда из третьего закона Ньютона следует, что нить действует на бруски тоже с равными по модулю силами:

$$T_2 = T_1.$$

Обозначим T модуль силы натяжения нити:

$$T_2 = T_1 = T.$$

Поскольку нить нерастяжима, модули перемещения брусков за любой промежуток времени одинаковы. Отсюда следует, что ускорения брусков равны. Обозначим модуль этого ускорения a:

$$a_1 = a_2 = a. \quad (3)$$

? **2.** Используя рисунок 22.1, объясните смысл следующих уравнений:

$$\begin{cases} Ox: & -T + F = m_1 a \\ Oy: & -m_1 g + N_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Ox: & T = m_2 a \\ Oy: & -m_2 g + N_2 = 0 \end{cases}$$

? **3.** Объясните, почему бруски, связанные *лёгкой нерастяжимой* нитью, движутся под действием силы $\vec{F}$ с таким же ускорением, как одно тело массой $m_1 + m_2$. Чему равно это ускорение?

? **4.** На гладком столе находятся два бруска, связанные лёгкой нерастяжимой нитью. Под действием горизонтальной силы 4 Н, приложенной к первому бруску, бруски движутся с ускорением 2 м/с^2, а сила натяжения нити равна 1 Н.

а) Чему равны массы брусков?

б) Какова будет сила натяжения нити, если тянуть бруски горизонтальной силой 2 Н, приложенной ко второму бруску?

? **5.** Два стальных цилиндра массой 1 кг и 3 кг подвешены на лёгких нерастяжимых нитях (рис. 22.2). Натяжение верхней нити 20 Н.

а) С каким ускорением движутся цилиндры? Куда оно направлено?

б) Чему равно натяжение нижней нити?

в) При каком натяжении верхней нити вес нижнего цилиндра равен силе тяжести, действующей на верхний цилиндр?

Рис. 22.2

2. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

Движение тел по горизонтали и вертикали

? **6.** На гладком столе находится брусок массой $m_б$, связанный с грузом массой $m_г$ лёгкой нерастяжимой нитью, переброшенной через неподвижный блок (рис. 22.3). Трением в блоке и его массой можно пренебречь. Чему равен модуль ускорения тел?

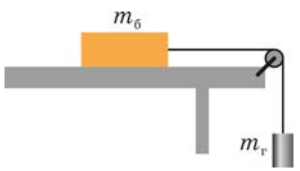


Рис. 22.3

? **7.** Чему равен в предыдущем задании вес груза, если $m_б = 2$ кг, а $m_г = 0{,}5$ кг? Почему вес груза оказался *меньше* действующей на него силы тяжести?

8. К концам легкой нерастяжимой нити, переброшенной через неподвижный блок, подвешены грузы массой m и M, причём $M > m$ (рис. 22.4). Трением в блоке и его массой можно пренебречь.

а) Чему равен модуль ускорения грузов?

б) Чему равна сила натяжения нити?

в) Чему равен вес каждого груза?

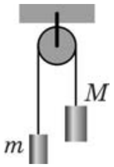


Рис. 22.4

9. Как объяснить, что грузы разной массы имеют в данном случае одинаковый вес?

Подсказка. Вспомните о весе груза, движущегося с ускорением.

10. К концам лёгкой нерастяжимой нити, переброшенной через лёгкий неподвижный блок, подвешены грузы массой по 4,5 кг (рис. 22.5). На один из грузов положен перегрузок массой 1 кг. Трением в блоке можно пренебречь. В начальный момент тела покоятся.

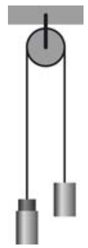


Рис. 22.5

а) С каким ускорением движутся тела?

б) С какой силой перегрузок давит на груз?

в) С какой силой блок давит на ось?

При наличии *подвижных* блоков ускорения тел, связанных нерастяжимой нитью, могут быть *различными*.

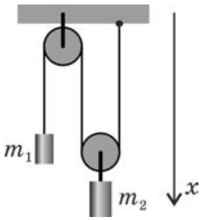


Рис. 22.6

11. Грузы массой m_1 и m_2 подвешены так, как показано на рисунке 22.6. Нить лёгкая и нерастяжимая, трением в блоках и их массой можно пренебречь.

а) Чему равно отношение модулей ускорения первого и второго грузов?

б) Чему равно отношение сил, действующих со стороны нити на первый и второй грузы?

в) Чему равны проекции ускорений первого и второго груза на показанную на рисунке ось x?

г) При каком соотношении масс грузов ускорение первого груза направлено вверх?

д) Чему равна сила натяжения нити?

е) При каком соотношении масс грузов вес *второго* груза равен силе тяжести, действующей на *первый* груз?

Движение по наклонной плоскости

Пусть на *гладкой* наклонной плоскости с углом наклона α находится брусок массой $m_б$, связанный с грузом массой $m_г$ лёгкой нерастяжимой нитью, переброшенной через блок (рис. 22.7).

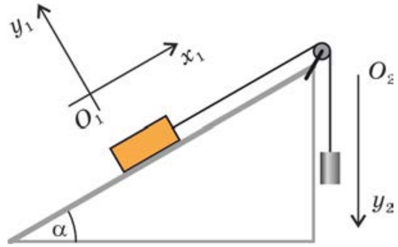


Рис. 22.7

При рассмотрении движения тела по наклонной плоскости удобно использовать систему координат с наклонными осями O_1x_1 O_1y_1, показанную на рисунке. А для рассмотрения движения груза по вертикали выберем направленную вниз ось O_2y_2.

Самое трудное в этой ситуации — правильно определить *направление* ускорения тел. Найдем сначала условие их *равновесия*.

12. Сделав чертёж, объясните смысл следующих уравнений для случая, когда тела находятся *в равновесии*:

$$O_1x_1:\quad T - m_б g \sin\alpha = 0$$
$$O_1y_1:\quad N - m_б g \cos\alpha = 0$$
$$O_2y_2:\quad m_г g - T = 0$$

13. Объясните, почему:

а) если $m_г > m_б \sin\alpha$, ускорение бруска направлено вверх.

б) если $m_г < m_б \sin\alpha$, ускорение бруска направлено вниз.

в) Объясните, для какого из этих двух случаев справедлива следующая система уравнений:

$$O_1x_1:\quad T - m_б g \sin\alpha = m_б a$$
$$O_1y_1:\quad N - m_б g \cos\alpha = 0$$
$$O_2y_2:\quad m_г g - T = m_г a$$

14. Чему равен модуль ускорения бруска, если он движется вдоль наклонной плоскости *вверх*?

15. Чему равен модуль ускорения бруска, если он движется вдоль наклонной плоскости *вниз*?

16. Брусок массой 1 кг находится на гладкой наклонной плоскости с углом наклона 30°. Он связан с грузом массой 200 г лёгкой нерастяжимой нитью, переброшенной через блок. В начальный момент тела покоятся, и груз находится на высоте 20 см над столом. На какой высоте над столом будет находиться груз через 0,2 с?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

17. К концам лёгкой нерастяжимой нити, переброшенной через блок, подвешены грузы. Масса одного из грузов 2 кг. Массой блока и трением в блоке можно пренебречь. Блок подвешен к динамометру. Во время движения грузов динамометр показывает 16 Н.
а) Чему равна сила натяжения нити?
б) С каким по модулю ускорением движутся тела?
в) Чему равна масса второго груза?

18. К концам лёгкой нерастяжимой нити, переброшенной через неподвижный блок, подвешены грузы массой по 4 кг каждый. На один из грузов положен перегрузок. Сила натяжения нити во время движения грузов равна 50 Н.
а) С каким по модулю ускорением движутся тела?
б) Чему равен вес перегрузка?
в) Чему равна масса перегрузка?

19. На гладком столе лежит вытянутая в прямую линию цепочка из 100 звеньев. За первое звено, расположенное слева, тянут влево с силой 2 Н, направленной вдоль цепочки. С какой силой взаимодействуют 20-е и 21-е звенья?
Подсказка. Представьте цепочку состоящей из двух частей, состоящих из 20 и 80 звеньев.

20. Найдите ускорения тел в системе, изображённой на рисунке 22.8. Масса бруска $m_б$, масса груза $m_г$, угол наклона плоскости α. Нить лёгкая и нерастяжимая, трением и массой блоков можно пренебречь.

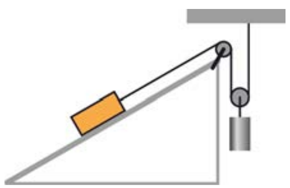


Рис. 22.8

§ 23. ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛ. УЧЁТ ТРЕНИЯ СО СТОРОНЫ ВНЕШНИХ ТЕЛ

1. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Движение поезда

Пусть поезд едет с *постоянной* скоростью по *горизонтальной* дороге. При этом вертикальные силы, действующие на любой из вагонов и на локомотив[1] (сила тяжести и сила нормальной реакции) уравновешивают друг друга.

Рассмотрим горизонтально направленные силы. Начнём с *последнего* вагона (рис. 23.1).

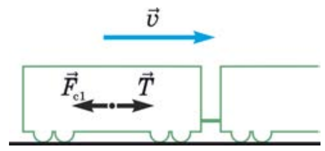


Рис. 23.1

На него действует направленная *вперёд* сила упругости $\vec{T}$ со стороны вагонной сцепки. Кроме того, на него действует направленная *назад* сила трения качения между колёсами вагона и рельсами[2]. Эту силу иногда называют *силой сопротивления* движению. Её характеризуют *коэффициентом сопротивления* k, принимая приближенно, что

$$F_{сопр} = kN,$$

где N — модуль силы нормальной реакции.

1. Чему равна сила сопротивления, действующая на вагон массой 60 т, если коэффициент сопротивления $k = 0{,}005$?

Обозначим $\vec{F}_{c1}$ силу сопротивления, действующую на один вагон. Когда он движется с *постоянной* скоростью

$$F_{c1} = T.$$

2. Чему равна сила натяжения передней сцепки первого вагона, если в поезде n одинаковых вагонов?

Рассмотрим теперь силы, действующие на *локомотив*, который едет с постоянной скоростью и тянет за собой n вагонов.

---

[1] Тепловоз или электровоз, который тянет поезд.
[2] О силе трения качения было кратко рассказано в курсе физики основной школы. Напомним, что эта сила тем меньше, чем *твёрже* соприкасающиеся поверхности. Будем считать, что силой сопротивления воздуха можно пренебречь.

На локомотив действуют направленные *назад* сила сопротивления $\vec{F}_{сл}$ и сила натяжения сцепки между локомотивом и первым вагоном, равная $nF_{с1}$ (рис. 23.2).

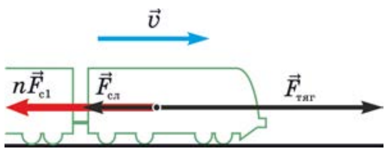


Рис. 23.2

Какая же направленная *вперёд* сила уравновешивает эти силы?

Ведущие колёса локомотива (соединённые с двигателем) толкают дорогу *назад*, действуя на неё силой трения *покоя* (колёса не проскальзывают). По третьему закону Ньютона со стороны дороги на локомотив действует такая же по модулю, но направленная *вперёд* сила *такой же физической природы*, то есть трения *покоя*. Её называют *силой тяги* и обозначают $\vec{F}_{тяг}$. С похожей силой мы уже познакомились, когда рассматривали силу, разгоняющую автомобиль (см. § 17).

Обозначим массу локомотива M и будем считать, что *все колёса локомотива — ведущие* (в современных локомотивах так и есть). В таком случае *вся* сила нормальной реакции, действующая на локомотив и равная по модулю Mg, распределяется на *ведущие* колеса. Следовательно, максимальная сила трения покоя равна в данном случае μMg. Отсюда следует, что локомотив массой M может развить *максимальную* силу тяги

$$F_{тяг\,max} = \mu Mg .$$

Когда поезд едет с постоянной скоростью, сила тяги уравновешивает силу сопротивления, действующую на *весь* поезд:

$$F_{тяг} = F_{сл} + nF_{с1}.$$

? **3.** Какое наибольшее число одинаковых вагонов может тянуть по *горизонтальной* дороге с постоянной скоростью локомотив, если коэффициент сопротивления для вагонов и локомотива при данной скорости равен 0,005, а масса локомотива в 3 раза больше массы одного вагона? Все колёса локомотива считайте ведущими. Коэффициент трения скольжения между колёсами локомотива и рельсами примите равным 0,3.

Полученный в этом задании ответ соответствует *горизонтальной* дороге. Тянуть на подъём всего в 1° локомотив сможет

примерно в 3 раза меньше вагонов, чем по горизонтальной дороге. А небольшие подъёмы есть на любой дороге.

? **4.** Локомотив тянет с постоянной скоростью 18 вагонов. При этом сцепка между шестым и седьмым вагонами (считая от локомотива) натянута с силой 120 кН. Чему равна сила тяги локомотива? Примите, что массы вагонов равны, а масса локомотива в 3 раза больше массы одного вагона.

Грузовик тянет прицеп по склону

Пусть грузовик массой M, у которого *все колёса ведущие*, тянет вверх по склону прицеп массой m (рис. 23.3).

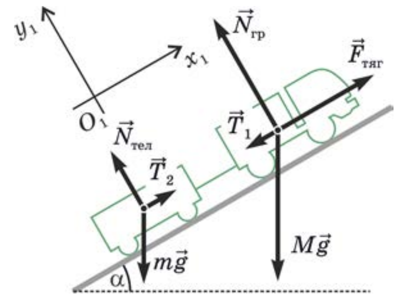


Рис. 23.3

Обозначим α угол наклона склона, а μ — коэффициент трения между колёсами *грузовика* и дорогой. Будем считать, что трос лёгкий и нерастяжимый, а трением качения между колёсами прицепа и дорогой можно пренебречь.

Как мы уже знаем, действующая на грузовик сила тяги — это направленная *вверх* вдоль склона сила трения *покоя*, действующая на ведущие колёса.

? **5.** Чему равна сила тяги при *равномерном* движении грузовика и прицепа?

Подсказка. При равномерном движении равнодействующая сил, приложенных к грузовику и к прицепу, равна нулю.

? **6.** Чему равна *максимальная* сила тяги грузовика?

Подсказка. Максимальная сила тяги равна максимальной силе трения покоя.

? **7.** Какой наибольшей массы прицеп может поднимать грузовик массой 5 т, у которого все колёса ведущие, по склону с углом наклона 10°? Трением качения между колёсами прицепа и склоном можно пренебречь. Коэффициент трения между колёсами грузовика и склоном равен 0,5.

Если грузовик и прицеп движутся *с ускорением*, равнодействующая сил, приложенных к каждому телу, не равна нулю.

(рис. 24.4). К нижнему бруску привязана лёгкая нерастяжимая нить, переброшенная через блок, а к нити подвешен груз массой $m_г = 0{,}2$ кг. В начальный момент бруски покоятся.

а) При каком наименьшем коэффициенте трения μ_{min} между брусками они будут двигаться как единое целое?

б) С каким ускорением (ускорениями) движутся бруски при коэффициенте трения между ними 0,5?

в) С каким ускорением (ускорениями) движутся бруски, если коэффициент трения между ними равен 0,1?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

19. На гладком столе лежит доска длиной l и массой M. На одном конце доски находится небольшой брусок массой m (рис. 24.7). Коэффициент трения между бруском и доской μ. В начальный момент тела покоятся. Какую наименьшую скорость надо толчком сообщить доске, чтобы она выскользнула из-под бруска?

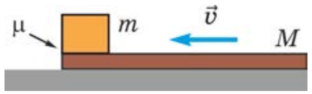


Рис. 24.7

20. На гладком столе лежат один на другом три одинаковых бруска массой $m = 100$ г каждый (рис. 24.8). Коэффициент трения между брусками $\mu = 0{,}2$. К среднему бруску приложена горизонтально направленная сила $\vec{F}$.

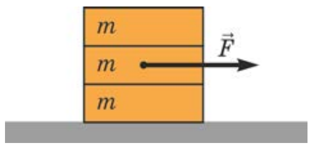


Рис. 24.8

а) С каким максимально возможным ускорением может двигаться верхний брусок?

б) С каким максимально возможным ускорением может двигаться нижний брусок?

в) При каких значениях силы F все бруски будут двигаться как единое целое?

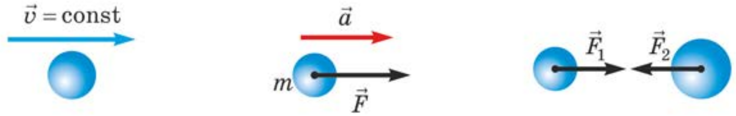
ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА

Первый закон Ньютона
Инерциальная система отсчета:

Второй закон Ньютона
$\vec{F} = m\vec{a}$

Третий закон Ньютона
$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

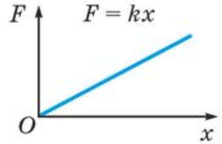


Закон всемирного тяготения

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

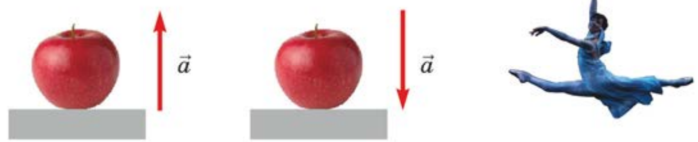
Закон Гука

$F_x = -kx$



Вес тела, движущегося с ускорением

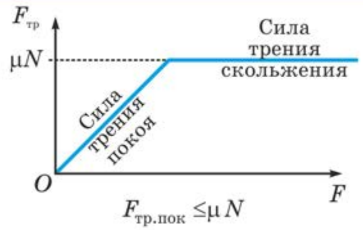
Невесомость



$P = m(g + a)$ $P = m(g - a)$ $\vec{a} = \vec{g} \Leftrightarrow \vec{P} = 0$

Силы трения

$F_{тр.ск} = \mu N$



$F_{тр.пок} \le \mu N$

Расчёт передаваемого ракете импульса

Рассмотрим несколько упрощённый пример расчёта скорости движения ракеты.

? **2.** При работе двигателя из сопла ракеты массой 100 т ежесекундно выбрасывается 100 кг газа со скоростью 4 км/с относительно ракеты. Считайте, что изменением массы ракеты за рассматриваемый промежуток времени можно пренебречь.
а) Чему равен импульс выброшенного за 1 с газа в инерциальной системе отсчёта, в которой ракета в начальный момент покоилась?
б) Чему равно изменение импульса ракеты за 1 с в той же системе отсчёта?
в) Какая сила действовала на ракету со стороны газа?
г) Чему равно ускорение ракеты в упомянутой системе отсчёта?

2. РАЗВИТИЕ РАКЕТОСТРОЕНИЯ И ОСВОЕНИЕ КОСМОСА

Основы теории реактивного движения заложил Константин Эдуардович Циолковский.

К. Э. Циолковский
(1857–1935)

После перенесённой в детстве скарлатины он практически оглох и не мог посещать школу. Но он оказался гениальным самоучкой и стал одним из самых просвещённых людей своего времени.

Исследования, положившие начало космической эры человечества, Константин Эдуардович проводил, работая учителем калужской гимназии.

Он предложил использовать многоступенчатые ракеты, разработал принципы систем жизнеобеспечения экипажа.

К. Э. Циолковскому принадлежит знаменитое изречение: «Земля – колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели».

Мечту Циолковского о космических полётах первыми осуществили наши соотечественники под руководством Сергея Павловича Королева.

Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР 4 октября 1957 года.

Первым космонавтом Земли стал Юрий Алексеевич Гагарин. Его космический полет состоялся 12 апреля 1961 года.

Ю. А. Гагарин (1934–1968)   **С. П. Королёв** (1907–1966)

Современное состояние космических исследований

Со времени первых космических полётов ракеты были значительно усовершенствованы, и сегодня на околоземные орбиты с их помощью выводятся большие космические станции, на которых постоянно работают космонавты.

Ракеты выводят на орбиты сотни спутников связи, которые обеспечивают передачи тысяч телевизионных программ и миллионов телефонных разговоров, благодаря чему вся планета окутана сегодня «паутиной» надёжных систем связи.

Запущены исследовательские ракеты на Венеру, Марс и другие планеты Солнечной системы. На спутниках устанавливают мощные телескопы, с помощью которых учёные заглядывают всё дальше и дальше в глубины Вселенной.

Россия принимает активное участие в международных космических проектах, в частности, с помощью международных космических станций.

14. Брусок массой 250 г скользит по гладкому столу со скоростью 2 м/с и сталкивается с прикреплённой к стене горизонтальной пружиной жёсткостью 200 Н/м (рис. 31.10).

Рис. 31.10

а) Чему равна начальная полная механическая энергия системы «брусок + пружина»?
б) Чему равна потенциальная энергия пружины в момент, когда её деформация максимальна?
в) Чему равна максимальная деформация пружины?
г) Чему равна скорость бруска в момент, когда деформация пружины в 2 раза меньше максимальной?
д) Чему равна скорость бруска после взаимодействия с пружиной?

15. Горизонтальная пружина жёсткостью 200 Н/м прижата к стене бруском массой 50 г (рис. 31.11). В начальный момент деформация пружины равна по модулю 3 см, а брусок покоится. Брусок отпускают без толчка, и он скользит по столу, пройдя до остановки 45 см.

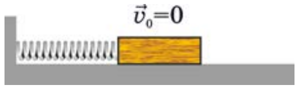


Рис. 31.11

а) Чему равна начальная полная механическая энергия системы «брусок + пружина»?
б) Чему равна конечная полная механическая энергия системы «брусок + пружина»?
б) Чему равна работа силы трения, действовавшей на брусок со стороны стола?
в) Чему равна сила трения между бруском и столом?
в) Чему равен коэффициент трения между бруском и столом?

§ 32. РАЗРЫВЫ И СТОЛКНОВЕНИЯ

1. РАЗРЫВ ЛЕТЯЩЕГО СНАРЯДА

В этом параграфе мы будем предполагать, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.

? **1.** Выпущенный *вертикально вверх* снаряд разорвался *в верхней точке траектории* на два осколка массой m_1 и m_2 (рис. 32.1). Чему равно отношение скоростей осколков после[1] разрыва?

Подсказка. Скорость снаряда в верхней точке траектории равна нулю. Воспользуйтесь законом сохранения импульса.

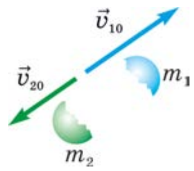


Рис. 32.1

? **2.** Тело, находящееся на высоте h, движется со скоростью, равной по модулю v_0. Чему равен модуль скорости тела при падении на землю?

Подсказка. Воспользуйтесь законом сохранения энергии.

? **3.** Снаряд, выпущенный вертикально вверх с начальной скоростью v_0, разорвался в верхней точке траектории на два осколка, модули скорости которых равны v_{10} и v_{20}. Каковы скорости осколков при падении на землю?

Подсказка. Высоту, на которой разорвался снаряд, можно связать с его начальной скоростью.

? **4.** Снаряд, выпущенный вертикально вверх с начальной скоростью v_0, разорвался в верхней точке траектории на два осколка, которые упали на землю со скоростями v_1 и v_2.
а) Чему равно отношение скоростей осколков после разрыва?
б) Чему равно отношение масс осколков?

? **5.** Снаряд, выпущенный из пушки вертикально вверх, разорвался в верхней точке траектории на два осколка, скорости которых после разрыва направлены горизонтально. Первый осколок упал на расстоянии 1 км от пушки, а второй — на расстоянии 500 м.

[1] Под скоростями *до* и *после* разрыва или столкновения здесь и далее мы понимаем скорости *непосредственно* до и *сразу* после разрыва или столкновения.

а) Как связаны скорости v_{10} и v_{20} осколков после разрыва?
б) Чему равно отношение масс осколков?

? **6.** Снаряд, выпущенный из пушки со скоростью v_0 под углом α к горизонту, разорвался в верхней точке траектории на два осколка равной массы. Скорости осколков после разрыва направлены горизонтально. Первый из них упал недалеко от пушки.
а) Как связана скорость первого осколка после разрыва со скоростью снаряда перед разрывом?
б) Как связана скорость второго осколка после разрыва со скоростью снаряда перед разрывом?
в) На каком расстоянии от пушки упал бы снаряд, если бы он не разорвался?
г) На каком расстоянии от пушки упал второй осколок?

2. УПРУГИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Столкновение тел называют *упругим*, если *механическая энергия тел в результате столкновения не изменяется*. Таким можно считать, например, рассмотренное выше столкновение бильярдных шаров.

Столкновение двух тел называют *центральным*, если их скорости до столкновения и после него направлены вдоль одной прямой.

Пусть шар массой m_1, движущийся со скоростью $\vec{v}_1$, налетает на *покоящийся* шар массой m_2. Обозначим $\vec{u}_1$ и $\vec{u}_2$ скорости шаров после упругого центрального столкновения. Направим ось x по направлению скорости $\vec{v}_1$ налетающего шара[1].

? **7.** Объясните смысл следующих уравнений:

$$m_1u_{1x} + m_2u_{2x} = m_1v_1 . \qquad (1)$$

$$\frac{m_1u_{1x}^2}{2} + \frac{m_2u_{2x}^2}{2} = \frac{m_1v_1^2}{2} . \qquad (2)$$

Подсказка. До и после столкновения тела движутся вдоль оси x, поэтому квадраты скоростей равны квадратам проекций скоростей: $u_1^2 = u_{1x}^2$, $u_2^2 = u_{2x}^2$.

[1] В таком случае проекция скорости $\vec{v}_1$ на ось x равна v_1. Поэтому для упрощения формул мы пишем v_1 вместо v_{1x}.

Переход к системе двух линейных уравнений

Перепишем уравнения (1) и (2) так, чтобы величины, относящиеся ко второму шару, находились слева от знака равенства, а к первому шару — справа. Кроме того, сократим общий множитель 1/2. Мы получим:

$$m_2u_{2x} = m_1(v_1 - u_{1x}) . \qquad (3)$$

$$m_2u_{2x}^2 = m_1(v_1^2 - u_{1x}^2) . \qquad (4)$$

? **8.** Объясните, как из этих уравнений получить уравнение

$$u_{2x} = v_1 + u_{1x} . \qquad (5)$$

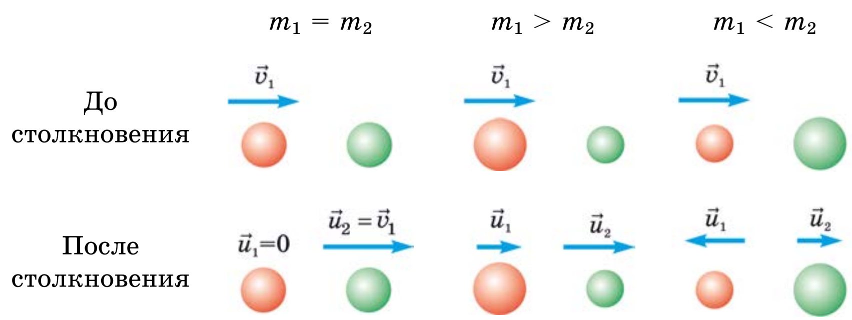
Подсказка. Если столкновение *произошло*, то обе части уравнения (3) *отличны от нуля*. Поэтому можно разделить левую и правую части уравнения (4) соответственно на левую и правую части уравнения (3).

Уравнения (3) и (5) представляют собой *систему двух линейных уравнений*. Используя эту систему, легко выполнить следующее задание.

? **9.** Чему равны проекции скоростей шаров после столкновения?

Из формул, полученных при выполнении этого задания, можно сделать качественные выводы, которые помогут при решении задач.

? **10.** Шар массой m_1 налетает со скоростью $\vec{v}_1$ на *покоящийся* шар массой m_2. Удар упругий центральный. Используя результаты предыдущего задания, прокомментируйте содержание следующей таблицы.



§ 33. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

1. ГРУЗ, ПОДВЕШЕННЫЙ НА НИТИ И СТЕРЖНЕ

«Тройной вес»

Шарик массой m подвешен в точке O на нити длиной l (рис. 33.1). Отведём его на угол 90° и отпустим без толчка. Шарик начнёт двигаться *по окружности*.

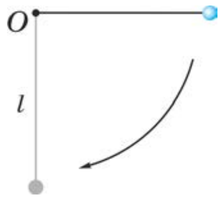


Рис. 33.1

Обозначим $\vec{v}$ скорость, с которой шарик проходит положение равновесия (рис. 33.2).

? **1.** Используя рисунок 33.2, ответьте на вопросы:

а) Какие силы показаны на рисунке?

б) Как направлено ускорение шарика?

в) Выразите модуль равнодействующей через модули показанных сил.

? **2.** Перенесите в тетрадь рисунок 33.2, укажите на нём ускорение шарика и объясните смысл следующих уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{mv^2}{2} = mgl & (1) \\ \dfrac{mv^2}{l} = T - mg & (2) \end{cases}$$

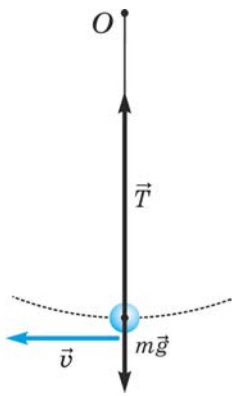


Рис. 33.2

? **3.** Шарик массой 100 г подвешен на нити длиной 1 м. Его отклоняют на 90° и отпускают без толчка.

а) Чему равна сила натяжения нити, когда шарик проходит положение равновесия?

б) Во сколько раз вес шарика при прохождении положения равновесия больше силы тяжести?

Подсказки. Чтобы найти силу натяжения нити, удобно разделить уравнение (2) на уравнение (1). Вспомните определение веса тела.

Итак, в данном случае при прохождении шариком положения равновесия нить должна выдержать «*тройной* вес»!

Поставим опыт

Сообщим шарику в *нижней* точке такую скорость $\vec{v}_н$, чтобы он двигался в вертикальной плоскости *по окружности* (рис. 33.3).

На рисунке показаны последовательные положения шарика через *равные* промежутки времени (их можно зафиксировать, например, с помощью видеосъёмки).

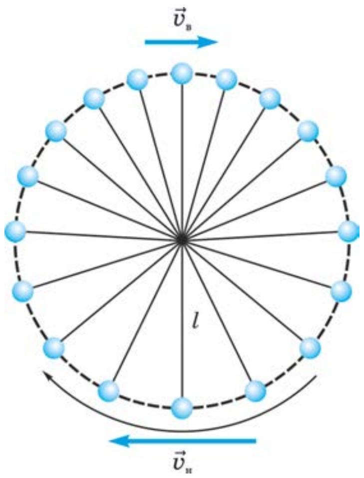


Рис. 33.3

? **4.** Почему в верхней части рисунка расстояния между последовательными положениями шарика меньше?

? **5.** Сделайте в тетради чертёж, на котором изобразите:

а) силы, действующие на шарик в верхней и нижней точках окружности (обозначьте $\vec{T}_в$ и $\vec{T}_н$ силы натяжения нити в этих точках);

б) ускорение шарика в этих точках.

? **6.** Объясните смысл следующих уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{mv_н^2}{2} - \dfrac{mv_в^2}{2} = 2mgl & (3) \\ \dfrac{mv_в^2}{l} = T_в + mg & (4) \\ \dfrac{mv_н^2}{l} = T_н - mg & (5) \end{cases}$$

? **7.** Подвешенный на нити шарик массой 100 г вращается в вертикальной плоскости. Насколько больше сила натяжения нити, когда шарик проходит положение равновесия, чем когда он находится в верхней точке окружности?

Подсказка. Удобно вычесть уравнение (4) из уравнения (5) и сравнить полученное уравнение с уравнением (3).

«Шестикратный вес»

Шарик движется *по окружности* при условии, что нить *натянута*. Поэтому *минимальная* скорость, которую нужно сообщить шарику в нижней точке, чтобы он стал двигаться по окружности, должна быть такой, чтобы *сила натяжения нити обратилась в нуль только в верхней точке окружности*.

? **8.** Шарику, подвешенному на нити длиной l, сообщили в нижней точке *минимальную* горизонтальную скорость, необходимую для того, чтобы он начал двигаться по окружности. Сделайте чертёж, на котором изобразите силы, действующие на шарик в верхней и нижней точках окружности. Чему в этом случае равны:

а) скорость шарика в верхней точке окружности?

б) ускорение шарика в верхней точке окружности?

в) скорость шарика в *нижней* точке окружности?

г) вес шарика в нижней точке окружности?

Подсказка. Воспользуйтесь уравнениями (3) – (5).

Итак, когда груз проходит нижнюю точку, нить должна выдерживать шестикратный вес груза!

В какой точке шарик сойдёт с окружности?

Пусть теперь скорость шарика в нижней точке *недостаточна* для того, чтобы он мог совершить полный оборот.

В таком случае есть *две* возможности.

1) Шарик не поднимется выше точки подвеса O. Тогда он начнёт колебаться между крайними положениями (рис. 33.4).

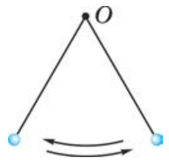


Рис. 33.4

2) Шарик поднимется выше точки подвеса, но сила натяжения нити обратится в нуль в некоторой точке A (рис. 33.5). После этого шарик будет двигаться *по параболе*, показанной красным пунктиром. Когда шарик находится в точке A, центростремительное ускорение ему сообщает *только составляющая силы тяжести, направленная вдоль радиуса к центру окружности*. На рисунке показано, как найти модуль этой составляющей (отрезок зелёного цвета).

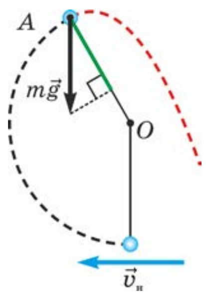


Рис.33.5

? **9.** Шарику массой m, подвешенному на нити длиной l, сообщают горизонтальную начальную скорость v_0. Когда шарик находится на высоте h, сила натяжения нити обращается в нуль. Обозначим v скорость шарика в этот момент. Используя рисунок 33.6:

а) объясните смысл уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{mv_0^2}{2} - \dfrac{mv^2}{2} = mgh & (6) \\ \dfrac{mv^2}{l} = mg\cos\alpha & (7) \end{cases}$$

б) выразите h через l и α.

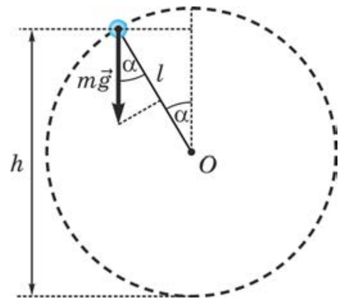


Рис. 33.6

? **10.** Шарику массой 200 г, подвешенному на нити длиной 50 см, сообщают горизонтальную скорость 4 м/с.

а) До какой высоты (по отношению к положению равновесия) шарик будет двигаться *по окружности*?

б) Чему будет равна сила натяжения нити, когда шарик будет находиться на одной *горизонтали* с точкой подвеса?

Подсказка. Когда шарик находится на одной горизонтали с точкой подвеса, центростремительное ускорение шарику сообщает только сила натяжения нити.

? **11.** Небольшая шайба массой m лежит внутри закреплённого цилиндра. Ось цилиндра горизонтальна (рис. 33.7). Внутренний радиус цилиндра 30 см, стенки цилиндра *гладкие*. Какую скорость v_0 надо сообщить шайбе перпендикулярно оси цилиндра, чтобы она:

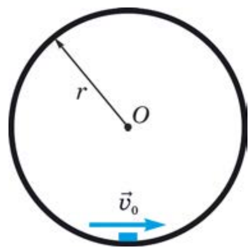


Рис. 33.7

а) совершила полный оборот, двигаясь по окружности?

б) оторвалась от поверхности цилиндра на высоте 40 см?

Подсказка. Движение шайбы в цилиндре отличается от движения подвешенного на нити шарика только тем, что роль силы натяжения нити играет сила нормальной реакции, а длину нити l надо заменить на радиус цилиндра r.

а) На какой высоте h (по отношению к нижней точке окружности) шайба оторвётся от жёлоба?
б) С какой силой шайба давит на жёлоб, когда она находится на одной горизонтали с центром окружности?

21. На гладкой полусфере радиуса r, укреплённой на столе, лежит небольшая шайба. Ей сообщают начальную горизонтальную скорость v_0. На какой высоте h от стола шайба оторвётся от полусферы?

Подсказка. Если начальная скорость достаточно велика, шайба оторвётся от полусферы *сразу*.

22. На укреплённой на столе полусфере радиуса r лежит небольшая шайба массой m. От незначительного толчка шайба начинает соскальзывать. Вследствие трения за время, в течение которого шайба скользила по полусфере, выделилось количество теплоты Q.
а) На какой высоте h шайба оторвалась от полусферы?
б) На какой высоте h шайба оторвалась от полусферы, если выделившееся количество теплоты равно кинетической энергии шайбы в момент отрыва?

23 . Впервые в мире круговой виток в вертикальной плоскости выполнил русский летчик П. Н. Нестеров в 1913 году. Эту фигуру высшего пилотажа называют «мёртвой петлей», или «петлей Нестерова». Нестеров так доверял своим расчётам, что перед выполнением «мёртвой петли» не пристегнулся ремнями к креслу пилота. Расчёт лётчика оказался правильным: ремни не понадобились! Почему при выполнении «мёртвой петли» лётчик не выпадает из кресла пилота в верхней точке траектории?

§ 34. ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛ

1. ГЛАДКАЯ ГОРКА И ШАЙБА

Горка с одной вершиной

Пусть на *гладком* столе покоится *гладкая* горка массой M и высотой H (рис. 34.1). На неё налетает со скоростью $\vec{v}_0$ шайба массой m. Двигаясь по горке, шайба не отрывается от неё.

Рис. 34.1

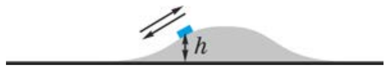


Рис. 34.2

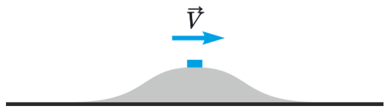


Рис. 34.3


Рис. 34.4

Возможны *три* варианта развития событий.

1) Шайба не достигнет вершины горки и соскользнёт по *тому же* склону (рис. 34.2).

2) Шайба достигнет вершины горки в момент, когда их скорости относительно стола *равны* (рис. 34.3).

3) Шайба «перевалит» через вершину горки и соскользнет по *другому* склону (рис. 34.4).

Второй вариант — «пограничный». Поэтому с него и начнём: выясним, при каких значениях M, H, m, v_0 он реализуется.

? **1.** Объясните, почему в случае, когда горка и шайба в результате взаимодействия движутся как единое целое со скоростью $\vec{V}$, справедливы уравнения

$$\begin{cases} (M+m)V = mv_0 & (1) \\ \dfrac{(M+m)V^2}{2} + mgH = \dfrac{mv_0^2}{2} & (2) \end{cases}$$

? **2.** Выразите общую скорость горки и шайбы V через M, H, m.

Подсказка. Используя уравнение (1), выразите v_0 через M, m, V и подставьте в уравнение (2).

? **3.** Используя полученную при выполнении предыдущего задания формулу, объясните, почему общая скорость горки и шайбы стремится к нулю, когда масса шайбы намного меньше массы горки.

? **4.** На покоящуюся гладкую горку массой M и высотой H налетает шайба массой m со скоростью $\vec{v}_0$. В результате взаимодействия горка и шайба стали двигаться как единое целое.

а) Чему равна начальная скорость шайбы, если $M = 1$ кг, $m = 100$ г, $H = 20$ см?

б) Чему равна высота горки, если $v_0 = 3$ м/с, а масса шайбы в 2 раза меньше массы горки?

в) Чему равна масса шайбы, если $v_0 = 1$ м/с, $M = 2$ кг, $H = 4$ см?

Рассмотрим теперь кратко оставшиеся варианты.

Пусть реализуется первый вариант: шайба не достигла вершины горки и соскользнула обратно, см. рисунок 34.2. В таком случае для нахождения значений конечной скорости горки и шайбы их можно рассматривать как тела, между которыми произошло *упругое столкновение* (см. § 32).

Действительно, в конечном состоянии шайба снова скользит по столу, поэтому её потенциальная энергия не изменилась по сравнению с начальной. Следовательно, сохранилась и суммарная кинетическая энергия горки и шайбы. Кроме того, сохранился и их суммарный импульс.

Начальную скорость шайбы можно найти, зная максимальную высоту, до которой она поднялась по горке.

? **5.** На покоящуюся гладкую горку массой 1 кг и высотой 15 см налетает слева шайба массой 300 г. Шайба достигает максимальной высоты 10 см.

а) Какова начальная скорость шайбы?

б) Чему равна общая скорость горки и шайбы в момент, когда шайба остановится *относительно горки*?

в) Чему равны конечные скорости горки и шайбы и как они направлены?

Подсказка. В момент, когда шайба достигла максимальной высоты, её скорость относительно стола равна скорости горки и направлена *горизонтально*.

Рассмотрим наконец третий вариант, когда шайба преодолевает горку и скользит по столу дальше.

? **6.** Объясните, почему в этом случае конечная скорость шайбы равна её начальной скорости, а конечная скорость горки равна *нулю*.

Подсказка. Это — *единственное* решение системы уравнений, выражающих законы сохранения энергии и импульса, если шайба в конечном состоянии находится по другую сторону горки.

Итак, поднимаясь на горку, шайба разгоняет её, а, спускаясь по другому склону, тормозит горку *до остановки*.

Горка с двумя вершинами

Возьмём теперь гладкую горку массой M с *двумя* вершинами высотой H и h (рис. 34.5). На более высокой из них в начальном состоянии покоится шайба массой m. Шайба начинает соскальзывать влево. При движении тел шайба не отрывалась от горки, а горка — от гладкого стола.

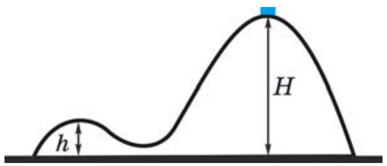


Рис. 34.5

? **7.** Какие физические величины сохраняются в данном случае?

? **8.** Запишите систему уравнений, выражающую законы сохранения, для момента, когда шайба будет на вершине высотой h. Какие величины можно найти с помощью этой системы? Выразите эти величины через приведённые выше.

? **9.** Чему равны скорости горки и шайбы, когда шайба находится на второй вершине горки, если $M = 100$ г, $m = 20$ г, $H = 8$ см, $h = 2$ см (рис.34.5)? Как будут направлены эти скорости?

Движение шайбы в бруске со сферической выемкой

Рассмотрим теперь случай, когда шайба движется во впадине между двумя вершинами гладкой горки. Такую «горку» представляют иногда как брусок с выемкой.

Пусть на гладком столе покоится брусок массой M с гладкой выемкой глубиной H. На левый край выемки осторожно кладут шайбу массой m и без толчка отпускают (рис. 34.6).

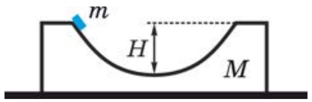


Рис. 34.6

? **10.** Какие физические величины сохраняются в данном случае?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

13. На одинаковой высоте на расстоянии 1 м друг от друга закреплены концы нерастяжимого троса длиной 2 м. Какой максимальной массы груз можно подвесить к середине троса, чтобы сила натяжения троса не превышала 100 Н?

14. Фонарь подвешен на двух тросах. Силы натяжения тросов равны 10 Н и 20 Н, а угол между тросами равен 120°. Чему равна масса m фонаря?

Подсказка. Если сумма трёх векторов равна нулю, то они образуют треугольник.

15. К куску картона, закреплённому на оси O, в точках A_1 и A_2 прикладывают силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (рис. 35.14). Известно, что OA_1 = 15 см, OA_2 = 20 см, F_1 = 20 Н, F_2 = 30 Н, $\alpha = 60°$, $\beta = 30°$.

а) Чему равны плечи сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$?

б) Чему равны моменты этих сил (с учётом знака)?

в) Может ли картон остаться в покое? А если нет, то в какую сторону он начнёт вращаться?

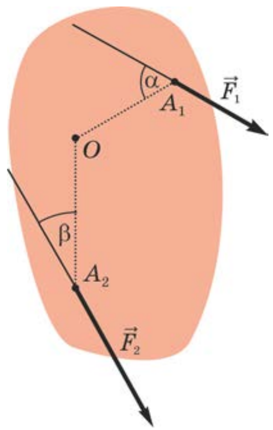


Рис. 35.14

16. Два человека несут цилиндрическую трубу массой 30 кг и длиной 4 м. Первый держит трубу на расстоянии 1,2 м от конца. На каком расстоянии от другого конца держит трубу второй человек, если нагрузка на его плечо составляет 100 Н?

17. Лёгкий стержень длиной 1 м закреплён на горизонтальной оси. Если к левому концу стержня подвесить некоторый груз, а к правому — гирю массой 1 кг, то стержень будет находиться в равновесии. А если тот же груз подвесить к правому концу стержня, то стержень будет находиться в равновесии, если к его левому концу подвешена гиря массой 16 кг.

а) Чему равна масса груза?

б) На каком расстоянии от центра стержня находится ось?

ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ:
КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ

§36. ПРИМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА

1. ВИДЫ РАВНОВЕСИЯ. РАВНОВЕСИЕ ТЕЛА НА ОПОРЕ

Поставим опыт

Обведём мелом или карандашом основание стоящего на столе цилиндра (рис. 36.1). *Фигуру*, ограниченную полученной окружностью, будем называть *площадью опоры*[1].

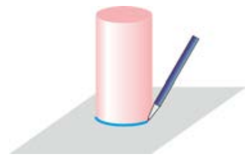


Рис. 36.1

Линия действия силы тяжести пересекает площадь опоры (рис. 36.2).

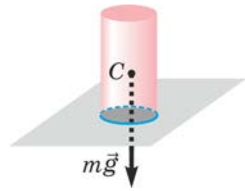


Рис. 36.2

Если наклонить цилиндр на небольшой угол, равновесие нарушится, потому что алгебраическая сумма моментов силы тяжести $m\vec{g}$ и силы нормальной реакции $\vec{N}$ опоры не будет равна нулю (например, относительно центра тяжести) (рис. 36.3).

Если отпустить цилиндр, то под действием этих сил цилиндр *вернётся* в начальное положение. Такое положение называют *устойчивым* равновесием.

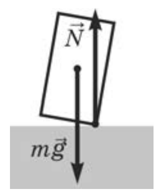


Рис. 36.3

? **1.** Чему равен тангенс максимального угла, на который можно наклонить стоящий на столе цилиндр радиусом r и высотой h (рис.36.4), чтобы он вернулся в начальное положение?

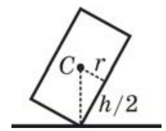


Рис. 36.4

Заметим теперь, что положение, показанное на рисунке 36.4, тоже соответствует равновесию цилиндра!

[1] В соответствии со сложившейся терминологией *площадью опоры* называют в данном случае не *площадь* фигуры, а *саму фигуру*.

? **2.** Объясните, почему в этом положении, *оба* условия равновесия для цилиндра выполнены.

Однако если отпустить цилиндр, он *не удержится* в этом положении: при малейшем отклонении от этого положения действующие на цилиндр сила тяжести и сила нормальной реакции опоры будут отклонять цилиндр еще дальше от положения равновесия. Такое равновесие называют *неустойчивым*.

? **3.** Изобразите схематически куб и конус в положении неустойчивого равновесия на горизонтальной поверхности. Может ли шар находиться в положении неустойчивого равновесия на этой поверхности?

Это задание даёт нам пример ещё одного вида равновесия (кроме устойчивого и неустойчивого). Шар на горизонтальной поверхности находится в равновесии при *любом* положении: если перекатить шар в любую другую точку поверхности, он снова окажется в положении равновесия. Такое равновесие называют *безразличным*.

? **4.** Какие из следующих тел могут находиться в безразличном равновесии на горизонтальной поверхности: *призма, конус, пирамида, цилиндр*? Какие из этих тел могут находиться на горизонтальной поверхности в устойчивом равновесии? Для каких тел существует положение неустойчивого равновесия? Считайте, что проскальзывания нет.

Опыт и расчёт показывают, что *тело на опоре может находиться в равновесии, только при условии, что линия действия силы тяжести пересекает площадь опоры*.

Площадью опоры является фигура наименьшего периметра, *описанная вокруг всех точек опоры тела*. Например, площадь опоры стола на четырех ножках — это *прямоугольник*, вершины которого — точки соприкосновения ножек стола с полом.

? **5.** Крышка стола массой m — квадрат со стороной d. К углам крышки прикреплены лёгкие ножки высотой H, которые перпендикулярны крышке стола. Стол приподнимают за одну из сторон его крышки. Считайте, что при этом ножки стола не проскальзывают по полу.

а) Насколько надо приподнять центр тяжести стола, чтобы стол после этого опрокинулся?

б) Какую работу при этом надо совершить?

Подсказка. При подъёме центра тяжести тела на h совершается работа mgh.

Цилиндр на наклонной плоскости

Поставим на доску цилиндр высотой h и радиусом r и начнём медленно наклонять доску (рис. 36.5). Коэффициент трения между доской и цилиндром равен μ.

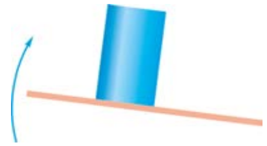


Рис. 36.5

При некотором угле наклона равновесие цилиндра нарушится. При этом возможны два варианта развития событий. Цилиндр может:

1) начать скользить по доске (рис. 36.6).

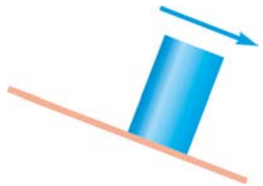


Рис. 36.6

2) опрокинуться (рис. 36.7).

Чтобы определить, какой из этих двух вариантов реализуется при заданных значениях h, r и μ, можно выбрать такой план действий.

1. Найдём, при каком угле наклона $\alpha_{ск}$ цилиндр начнёт *скользить*, если не опрокинется.

2. Найдём, при каком угле наклона $\alpha_{опр}$ цилиндр начнёт опрокидываться, если не будет скользить.

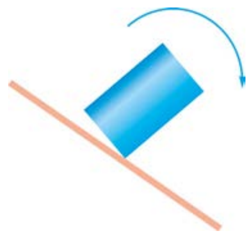


Рис. 36.7

3. Из сравнения полученных значений углов $\alpha_{ск}$ и $\alpha_{опр}$ сделаем вывод:

— если $\alpha_{опр} > \alpha_{ск}$, то цилиндр начнёт скользить, когда угол наклона станет равным $\alpha_{ск}$.

— если $\alpha_{опр} \le \alpha_{ск}$, то цилиндр начнёт опрокидываться, когда угол наклона станет равным $\alpha_{опр}$.

При расчётах удобнее сравнивать не углы $\alpha_{ск}$ и $\alpha_{опр}$, а их тангенсы[1].

? **6.** Чему равен тангенс угла наклона $\alpha_{ск}$, при котором цилиндр начал бы скользить, если бы он не опрокидывался?

[1] Для углов от 0 до 90° неравенство для углов и их тангенсов имеет одинаковый знак.

Следовательно, полстакана воды (примерно 100 г) — это около 5,5 молей воды (рис. 40.3).

Обратите внимание: *масса одного моля, выраженная в граммах, численно равна относительной молекулярной массе*.

Это справедливо как для воды, так и для *любого* вещества, потому что для него можно провести точно такой же расчёт массы одного моля.

Рис. 40.3

Равенство численного значения массы одного моля вещества (в граммах) и относительной молекулярной массы этого вещества не случайно: оно обусловлено тем, что в одном моле столько молекул, сколько атомных единиц массы в одном грамме. Это оказалось очень удобным для расчётов при проведении опытов, потому что массу образцов веществ измеряют часто в *граммах*.

В СИ молярную массу измеряют в кг/моль. Переводя граммы в килограммы, получаем для молярной массы воды

$$M_{H_2O} = 18 \cdot 10^{-3}\ \text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

? **6.** Чему равна молярная масса:

а) водорода? б) кислорода? в) углекислого газа?

Воздух представляет собой смесь различных газов, главным образом — азота и кислорода. При решении задач воздух часто считают газом с молярной массой

$$M_{\text{возд}} = 29 \cdot 10^{-3}\ \text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

? **7.** Объясните, почему масса образца вещества m, его молярная масса M и число молей ν в данном образце связаны соотношением

$$\nu = \frac{m}{M}. \qquad (4)$$

? **8.** Сколько молей в:

а) одном литре воды? 1 кг поваренной соли? в) воздухе, занимающем объём классной комнаты шириной 5 м, длиной 10 м и высотой 4 м? Плотность воздуха при комнатной температуре и атмосферном давлении равна $1,2\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

? **9.** Объясните, почему массу m_0 молекулы вещества можно выразить через его молярную массу M формулой

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$

? **10.** Чему равна масса одной молекулы воды?

? **11.** Объясните, почему число N молекул в образце вещества массой m можно найти с помощью формул

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A. \qquad ()$$

? **12.** Оцените число молекул в капельке воды радиусом 1 мм. Сравните найденное число молекул с числом звёзд в галактике, содержащей сто миллиардов звёзд (рис 40.4).

Рис. 40.4

? **13.** Почему изображённые на рисунке 40.2 шарики имеют равные объёмы при одинаковых температурах и давлениях?

4. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА (УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА–КЛАПЕЙРОНА)

Вернёмся теперь к соотношению $\frac{pV}{T} = kN$.

? **14.** Объясните, почему справедлива формула

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} k N_A. \qquad (6)$$

2. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (КПД) ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эффективность теплового двигателя определяется отношением полезной работы двигателя к количеству теплоты, полученному от нагревателя.

Коэффициентом полезного действия η **теплового двигателя называют выраженное в процентах отношение полезной работы $A_{пол}$, совершённой двигателем, к количеству теплоты Q_1, полученной от нагревателя:**

$$\eta = \frac{A_п}{Q_1} \cdot 100\%. \qquad (3)$$

Из соотношения $A_{пол} = Q_1 - Q_2$ следует, что

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%. \qquad (4)$$

Поскольку переданное холодильнику количество теплоты $Q_2 > 0$, *коэффициент полезного действия любого теплового двигателя меньше 100%.*

? **2.** За некоторое время нагреватель передал рабочему телу количество теплоты 5 кДж, а рабочее тело отдало холодильнику количество теплоты 4 кДж. Чему равен КПД?

Максимально возможный КПД теплового двигателя

Исследуя различные циклические процессы, французский учёный С. Карно доказал, что

максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%. \qquad (5)$$

В этой формуле T_1 — температура нагревателя, а T_2 — температура холодильника.

Как увеличить КПД теплового двигателя? Из формулы (5) следует, что этого можно достичь двумя способами: повышая температуру T_1 нагревателя и понижая температуру T_2 холодильника. Какой способ более эффективен?

Чтобы ответить на этот вопрос, заметим, что температура холодильника T_2 не может быть ниже температуры окружающего воздуха, поэтому особенно сильно понизить её невозможно. Следовательно, единственно возможный путь — повышать насколько возможно температуру T_1 нагревателя. Однако и тут есть ограничение: температура нагревателя не должна превышать температуру плавления материалов, из которых изготовлен двигатель.

Формула (5) соответствует максимально возможному КПД теплового двигателя. У реальных тепловых двигателей он существенно меньше максимально возможного. Например, КПД лучших двигателей внутреннего сгорания составляет 30%–40%.

? **3.** Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя, если температура нагревателя 1000 °C, а температура холодильника 20 °C?

3. ПРИМЕР РАСЧЁТА КПД ЦИКЛА

Вычисление КПД для циклов реальных тепловых двигателей требует использования высшей математики. Мы рассмотрим упрощенный циклический процесс $a - b - c - d - a$, происходящий с идеальным одноатомным газом (рис. 43.5).

Прежде чем начинать расчёты, проведём качественное рассмотрение.

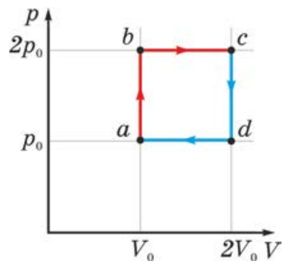


Рис. 43.5

? **4.** В следующей таблице приведены качественные характеристики некоторых этапов указанного циклического процесса. Перенесите таблицу в тетрадь и объясните содержание заполненных ячеек таблицы. Заполните остальные ячейки.

Этап процесса	Работа газа $A_г$	Изменение внутренней энергии газа ΔU	Переданное газу количество теплоты $Q = A_г + \Delta U$	Получает газ количество теплоты или отдает
$a - b$	$A_г = 0$	$\Delta U > 0$	$Q > 0$	Получает
$b - c$	$A_г > 0$			Получает
$c - d$				
$d - a$				

Второй закон термодинамики

Необратимость процессов обусловлена тем, что *более упорядоченное состояние вещества со временем переходит в менее упорядоченное*[24].

Например, вследствие трения кинетическая энергия тела, движущегося как *единое целое*, превращается в энергию *хаотического* движения молекул. При теплопередаче упорядоченность также уменьшается: у тел с разной температурой молекулы «рассортированы» по энергиям (средняя энергия молекул одного тела больше средней энергии молекул другого тела), а после выравнивания температур средние энергии молекул обоих тел становятся одинаковыми.

Утверждение о необратимости процессов в природе называют *вторым законом термодинамики*. Есть несколько равноценных с физической точки зрения формулировок этого закона. Например, немецкий ученый Р. Клаузиус предложил такую формулировку:

невозможен процесс, *единственным* результатом которого была бы передача некоторого количества теплоты от холодного тела к горячему.

В этой формулировке речь идёт о передаче некоторого количества теплоты как *единственном* результате. Домашний холодильник осуществляет передачу тепла в обратном направлении — от холодных продуктов в морозильной камере к тёплому окружающему воздуху, но при этом электродвигатель холодильника потребляет электроэнергию, которая вырабатывается на электростанции. Выработка же электроэнергии сопровождается необратимыми процессами. Поэтому охлаждение продуктов в морозильной камере — *не единственный* результат всего процесса.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИСЫ

Энергетический кризис понимают как недостаток энергии для развития промышленного производства. Он является сегодня одной из острых проблем цивилизации. Но как согласовать энергетический кризис с законом сохранения энергии: ведь если энергия *сохраняется*, то как её может *не хватать*?

Дело в том, что энергетический кризис состоит прежде всего в недостатке энергии, *пригодной для преобразования в механическую*. Например, мы видели, что при работе тепловых двигателей происходит преобразование химической энергии топлива в механическую энергию, которая затем превращается в энергию хаотического движения частиц. Это преобразование энергии является *необратимым*.

[24] Закономерность такого перехода обосновывается с помощью теории вероятностей, но это обоснование выходит за рамки нашего курса.

Запасы топлива на нашей планете неуклонно *уменьшаются*: например, разведанных запасов нефти при нынешнем темпе её использования хватит всего на несколько десятилетий. Таким образом, *энергетический кризис является следствием необратимости процессов, происходящих в природе и технике*.

Не менее серьезной проблемой, стоящей перед человечеством, является экологический кризис.

Огромные масштабы преобразования энергии уже начали оказывать воздействие на климат Земли и состав атмосферы.

Во всех тепловых двигателях в качестве холодильника используется окружающая среда (атмосферный воздух и вода открытых водоёмов). В результате происходит повышение температуры окружающей среды, называемое «тепловым загрязнением» (рис. 43.6).

Рис. 43.6

Тепловое загрязнение усугубляется тем, что при сгорании огромного количества топлива повышается концентрация углекислого газа в земной атмосфере. В результате атмосфера не пропускает в космическое пространство тепловое излучение нагретой Солнцем поверхности Земли. Из-за этого возникает так называемый парниковый эффект, вследствие которого температура может повыситься еще больше.

Учёные установили, что средняя температура на Земле в течение последних десятилетий неуклонно повышается. Одной из причин этого может быть работа большого и всё возрастающего количества тепловых двигателей — в основном на электростанциях и в автомобилях. Это грозит глобальным потеплением с весьма нежелательными последствиями. К их числу относятся таяние ледников и подъём уровня мирового океана.

Кроме того, при сжигании топлива в тепловых двигателях расходуется необходимый для жизни атмосферный кислород, а

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

8. В цилиндрическом сосуде под поршнем длительное время находятся вода и водяной пар. Масса воды в два раза больше массы пара. Медленно перемещая поршень, объём под поршнем увеличивают от 1 л до 6 л. Температура содержимого сосуда остаётся всё время равной 20 °С. Считайте, что объёмом воды можно пренебречь по сравнению с объёмом пара.

а) Какой пар находится под поршнем вначале?

б) Объясните, почему давление в сосуде не будет изменяться до тех пор, пока объём под поршнем не станет равным 3 л.

в) Чему равно давление в сосуде, когда объём под поршнем равен 3 л?

г) Чему равна масса пара в сосуде, когда объём под поршнем равен 3 л?

Подсказка. При этом весь объём сосуда заполнен насыщенным паром.

д) Во сколько раз увеличилась масса пара, когда объём под поршнем увеличился от 1 л до 3 л?

е) Чему равна масса воды в начальном состоянии?

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что в начальном состоянии масса воды в 2 раза больше массы пара.

ж) Как будет изменяться давление в сосуде при изменении объёма под поршнем от 3 л до 6 л?

Подсказка. Для ненасыщенного пара справедливо уравнение состояния идеального газа с *постоянной* массой.

з) Чему равно давление в сосуде, когда объём под поршнем равен 6 л?

и) Начертите примерный график зависимости давления пара под поршнем от объёма.

? **9.** Две запаянные U-образные трубки наклонили, как показано на рисунке 44.10. В какой трубке над водой находится только насыщенный пар, а в какой — воздух с паром? Обоснуйте свой ответ.

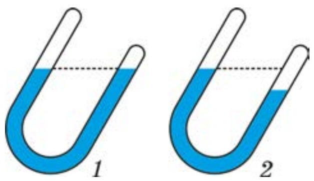


Рис. 44.10

§ 45. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

1. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ

На Земле много открытых водоёмов, с поверхности которых испаряется вода: океаны и моря занимают около 80 % поверхности Земли. Поэтому в воздухе всегда есть водяной пар.

Он легче воздуха, потому что молярная масса воды ($18 \cdot 10^{-3}$ кг $\cdot$ моль$^{-1}$) меньше молярной массы азота и кислорода, из которых в основном состоит воздух. Поэтому водяной пар поднимается вверх. При этом он расширяется, так как в верхних слоях атмосферы давление ниже, чем у поверхности Земли. Этот процесс приближённо можно считать адиабатическим, потому что за то время, пока он происходит, теплообмен пара с окружающим воздухом не успевает произойти.

Рис. 45.1

? **1.** Объясните, почему при этом пар охлаждается.

Как мы увидим далее, при охлаждении до некоторой температуры, которую называют *точкой росы*, водяной пар начинает конденсироваться, собираясь в крошечные капельки воды. Так образуются облака.

Они не падают потому, что парят в восходящих потоках воздуха подобно тому как парят дельтапланы (рис. 45.1).

Рис. 45.2

Но когда капли в облаках становятся слишком большими, они начинают всё-таки падать: идёт дождь (рис. 45.2).

Содержание водяного пара в воздухе часто характеризуют давлением, которое он оказывал бы, если бы не было других газов. Его называют *парциальным*[25] *давлением* водяного пара.

[25] Парциальный в переводе с латинского означает «частичный».

4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

Влажность воздуха измеряют часто *психрометром*[27] (рис. 45.4). Он состоит из сухого и влажного термометров.

Показания влажного термометра ниже, чем сухого, потому что при испарении жидкость охлаждается. Чем меньше относительная влажность воздуха, тем интенсивнее идёт испарение.

? **13.** Какой термометр на рисунке 45.4 расположен левее?

Итак, *по показаниям термометров можно определить относительную влажность воздуха*. Для этого используют психрометрическую таблицу, которую помещают часто на самом психрометре.

Чтобы определить относительную влажность воздуха, надо:

— снять показания термометров (в данном случае 33 °С и 23 °С);

—найти в таблице *строку*, соответствующую показаниям сухого термометра, и *столбец*, соответствующий разности показаний термометров (рис. 45.5);

— на пересечении строки и столбца прочитать *значение относительной влажности воздуха*.

? **14.** Используя психрометрическую таблицу (рис. 45.5), определите, при каких показаниях термометров относительная влажность воздуха равна 50 %.

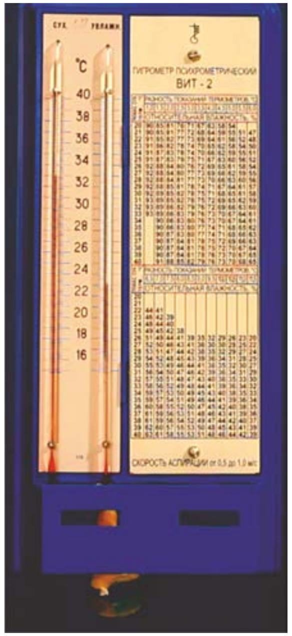


Рис. 45.4

ПОКАЗ. СУХ. ТЕРМ., °С	РАЗНОСТЬ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОМЕТРОВ, °С										
	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ, %										
20											
21											
22	44	41									
23	46	42	39								
24	48	44	40								
25	49	45	42	38							
26	51	49	44	41	39	35	32	29	26	23	20
27	52	50	46	43	41	36	30	30	28	25	22
28	53	51	47	44	42	38	35	32	29	27	24
29	54	52	48	45	43	39	36	34	31	28	25
30	55	53	49	46	44	41	38	35	32	30	27
31	56	54	50	47	46	42	39	36	34	31	29
32	57	55	51	48	47	43	40	38	35	33	30
33	58	56	52	49	48	44	41	39	36	34	32
34	59	57	53	50	49	45	43	40	38	35	33
35	59	57	54	51	49	46	44	41	39	36	34
36	60	58	55	52	50	47	45	42	40	38	35
37	61	59	56	53	51	48	46	43	41	39	36
38	61	59	56	54	52	49	47	44	42	40	37
39	62	60	57	55	53	50	48	45	43	41	39

Рис. 45.5

---

[27] От греческого «психрос» — холодный. Такое название обусловлено тем, что показания влажного термометра ниже, чем сухого.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Влажность воздуха

Относительная влажность

$$\varphi = \frac{p}{p_н} \cdot 100\%$$

Комфортные условия

$\varphi = 50 - 60$ %

Относительная влажность уменьшается при повышении температуры и увеличивается при понижении температуры

Точка росы: температура, при которой водяной пар становится насыщенным

Влажность измеряют психрометром с помощью психрометрической таблицы

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

15. В теплице объёмом 100 м^3 надо поддерживать относительную влажность не менее 60 %. Рано утром при температуре 15 °С в теплице выпала роса. Температура днём в теплице поднялась до 30 °С.

а) Чему равно парциальное давление водяного пара в теплице при 15 °С?

б) Чему равна масса водяного пара в теплице при этой температуре?

в) Каково минимально допустимое парциальное давление водяного пара в теплице при 30 °С?

г) Какова при этом масса водяного пара в теплице?

д) Какую массу воды надо испарить в теплице, чтобы поддержать в ней необходимую относительную влажность?

16. На психрометре оба термометра показывают одну и ту же температуру. Чему равна при этом относительная влажность воздуха? Поясните свой ответ.

ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ

§ 46. ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

1. УЧЁТ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Сжатие воздуха в сосуде, погружённом в воду

Рассмотрим следующую ситуацию. Пустую открытую стеклянную бутылку опускают в воду на глубину h.

? **1.** Объясните, почему при погружении бутылки дном *вниз* воздух из неё выходит пузырьками и бутылка наполняется водой (рис. 46.1).

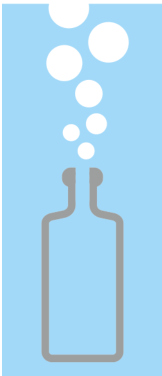


Рис. 46.1

? **2.** Почему при этом бутылка сразу тонет?

? **3.** Объясните, почему при погружении бутылки дном *вверх* воздух из неё не выходит (рис. 46.2).

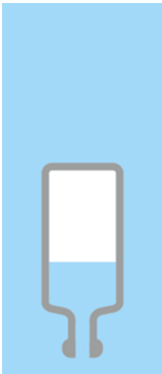


Рис. 46.2

? **4.** Объясните, почему при погружении бутылки дном вверх объём воздуха в ней уменьшается с увеличением глубины.

Обозначим плотность воды $\rho_в$, внутренний объём бутылки V_0, объём содержащегося в ней воздуха $V_{возд}$, атмосферное давление $p_а$. Будем считать, что температура воздуха в бутылке остается постоянной.

? **5.** Объясните, почему при погружении бутылки на глубину h справедливо уравнение

$$V_{возд}(p_а + \rho_в gh) = V_0 p_а . \qquad (1)$$

? **6.** Во сколько раз уменьшится объём воздуха в бутылке при погружении её на глубину 10 м?

? **7.** Как изменяется действующая на бутылку с воздухом сила Архимеда при увеличении глубины ?

? **8.** Объясните, почему в данном случае при нахождении силы Архимеда объём погруженного в воду тела надо считать равным суммарному объёму стекла и воздуха в бутылке.

При некоторой глубине погружения сила Архимеда станет равной силе тяжести. При погружении на еще бóльшую глубину сила Архимеда будет уже меньше силы тяжести, поэтому бутылка с воздухом начнёт тонуть.

Поставим вопрос: можно ли пренебречь силой тяжести, действующей на воздух, по сравнению с силой тяжести, действующей на бутылку?

? **9.** Во сколько раз масса воздуха, содержащегося в полулитровой бутылке, меньше массы бутылки? Примите массу бутылки равной 0,5 кг; плотность воздуха при 20 °С приближённо равна 1,2 кг/м^3.

Итак, мы видим, что массой воздуха в бутылке с хорошей точностью можно пренебречь по сравнению с массой бутылки.

Обозначим плотность стекла $\rho_с$, а объём стекла $V_с$.

? **10.** Объясните, почему когда погруженная полностью в воду бутылка с воздухом находится в равновесии, справедливо следующее уравнение:

$$\rho_с V_с g = \rho_в g(V_{возд} + V_с), \qquad (2)$$

Уравнения (1) и (2) можно рассматривать как систему двух уравнений с двумя неизвестными. Например, если известны значения всех входящих в эти уравнения величин, кроме $V_{возд}$ и h, их можно найти с помощью этих уравнений.

? **11.** В воду опускают дном вверх открытую бутылку, содержащую воздух при атмосферном давлении. Вместимость бутылки 0,5 л, объём стекла 0,2 л, плотность стекла в 2,5 раза больше плотности воды, атмосферное давление 100 кПа.

а) Чему равен объём воздуха в бутылке, когда погруженная в воду бутылка находится в равновесии?

б) На какой глубине будет при этом бутылка?

В рассмотренной ситуации массой воздуха можно пренебречь, потому что при давлении, близком к атмосферному, плотность воздуха намного меньше плотности воды и твёрдых тел.

Но в случаях, когда речь идёт о поднятии грузов с большой глубины с помощью сжатого воздуха, масса сжатого воздуха, может оказаться существенной.

Рассмотрим пример.

? **12.** Исследователи океанских глубин обнаружили на глубине 1 км затонувший сундук с сокровищами. Масса сундука 2,5 т, объём — 1 м^3. Сундук привязали тросом к прочному пустому водонепроницаемому мешку и стали закачивать в мешок воздух до тех пор, пока он начал всплывать вместе с сундуком. Для упрощения расчётов примем плотность морской воды равной плотности пресной воды. Будем считать воду несжимаемой, а объём оболочки мешка пренебрежимо малым. Температуру воды на большой глубине можно считать близкой к 0 °С.

а) Надо ли учитывать атмосферное давление для определения давления воздуха в мешке?

б) Обозначим ρ плотность воды, $m_с$ и $m_в$ массу сундука и массу воздуха в мешке, $V_с$ и $V_в$ объём сундука и объём воздуха в начале всплытия, $M_в$ — молярную массу воздуха, T — абсолютную температуру воды. Запишите систему двух уравнений с двумя неизвестными ($m_в$ и $V_в$), считая, что атмосферным давлением можно пренебречь.

в) Чему равен объём воздуха в мешке в тот момент, когда мешок с сундуком начал всплывать?

г) Чему равна масса воздуха в мешке, когда мешок с сундуком начал всплывать?

д) Можно ли не выпускать из мешка воздух до тех пор, пока мешок с сундуком не всплывут на поверхность?

Воздух в трубке с ртутным столбиком

В стеклянной трубке, запаянной с одного конца, находится воздух. Этот воздух отделён от атмосферного воздуха столбиком ртути длиной $l_{рт}$ (рис. 46.3).

Рис. 46.3

Рассмотрим, как зависит длина заполненной воздухом части трубки от положения трубки и температуры воздуха в ней. Будем считать, что длина трубки достаточно велика для того, чтобы ртуть не выливалась из трубки при любом её положении.

Обозначим атмосферное давление $p_а$, плотность ртути $\rho_{рт}$, а длину заполненной воздухом части трубки, когда она расположена горизонтально, обозначим l_0.

Примем сначала, что температура воздуха в трубке постоянна.

? **13.** Запишите уравнение, которое связывает величины $l_{рт}$, l_0 и длину l заполненной воздухом части трубки, когда она расположена:

а) вертикально открытым концом вверх;

б) вертикально открытым концом вниз.

? **14.** В начальный момент трубка расположена открытым концом вниз. Когда её перевернули открытым концом вверх, длина заполненной воздухом части трубки уменьшилась на 10 %. Чему равна длина столбика ртути, если атмосферное давление равно 760 мм рт. ст.?

Рассмотрим теперь случай, когда температура воздуха в трубке изменятся.

? **15.** В начальный момент трубка с воздухом и столбиком ртути расположена горизонтально. Когда её опустили в кипяток открытым концом вверх, длина заполненной воздухом части трубки увеличилась на 20 %. Чему равна начальная температура воздуха в трубке, если длина столбика ртути равна 5 см? Атмосферное давление равно 760 мм рт. ст.

Подсказка. Воспользуйтесь уравнением состояния идеального газа.

2. ДВА ГАЗА В ЦИЛИНДРЕ С ПОРШНЕМ ИЛИ ПЕРЕГОРОДКОЙ

Цилиндр расположен горизонтально

Рассмотрим сначала случай, когда цилиндр с *различными* газами расположен *горизонтально* (на рисунке 46.4 различные газы схематически обозначены разными цветами). В таком случае можно не учитывать вес поршня.


Рис. 46.4

Поршень может обладать различными свойствами, которые обязательно надо учитывать при решении задач.

? **16.** Что можно сказать о давлении и температуре двух газов, разделённых поршнем, если он:
а) теплопроводящий и может двигаться без трения?
б) не проводит тепло, но может двигаться без трения?
в) теплопроводящий, но надо учитывать трение между поршнем и стенками сосуда?

? **17.** В горизонтально расположенном цилиндре с поршнем по разные стороны от поршня находятся водород и кислород.
а) Каким соотношением связаны объёмы газов и количества вещества в них, если поршень подвижный и теплопроводящий?
б) Каким соотношением связаны объёмы и массы газов в этом случае?
в) Как связаны объёмы, массы и температуры газов, если поршень подвижный, но не проводит тепло?

Если сказано, что сосуд разделён не поршнем, а *перегородкой*, то подразумевается, что объёмы частей сосуда остаются *постоянными*. Перегородка тоже может обладать различными свойствами.

? **18.** Что можно сказать о температуре и парциальном давлении двух газов, разделённых перегородкой, если она:
а) теплопроводящая?
б) пористая (это обычно означает, что молекулы одного газа могут проникать сквозь перегородку, а молекулы другого газа не могут)?

? **19.** Теплоизолированный сосуд разделён пористой перегородкой на две равные части. В начальный момент в левой части сосуда находится 2 моля гелия, а в правой — 1 моль аргона. Начальная температура гелия 300 К, а начальная температура аргона 600 К. Атомы гелия могут свободно проникать через поры в перегородке, а атомы аргона не могут.
а) Имеет ли значение: проводит перегородка тепло или нет?
б) Атомы какого газа в начальный момент обладают большей средней кинетической энергией? Во сколько раз большей?
в) Внутренняя энергия какого газа в начальный момент больше? Во сколько раз больше?
г) Объясните, почему средние кинетические энергии атомов различных газов равны после достижения теплового равновесия.
д) Какая температура будет в сосуде при тепловом равновесии?
е) Во сколько раз средняя кинетическая энергия атомов гелия при тепловом равновесии будет больше их средней кинетической энергии в начальном состоянии?
ж) Как изменится давление гелия в левой части сосуда по сравнению с начальным после установления равновесия?
з) Как изменится давление аргона по сравнению с начальным после установления равновесия?
и) Давление в какой части сосуда будет больше после установления равновесия? Во сколько раз больше?

Цилиндр расположен вертикально

Если цилиндр расположен вертикально (рис. 46.5), то надо учитывать вес поршня, который давит на газ, находящийся в нижней части цилиндра. Из-за этого давление в нижней части цилиндра больше, чем в верхней. Рассмотрим пример.

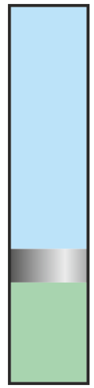


Рис. 46.5

? **20.** Вертикально расположенный цилиндрический сосуд высотой l разделён подвижным поршнем на две части. В верхней части высотой $l_в$ находится ν молей гелия, а в нижней части высотой $l_н$ — столько же молей водорода. Температура газов остается всё время равной T. Масса поршня m, площадь S, толщиной поршня можно пренебречь по сравнению с высотой сосуда.
а) Выразите давление в каждой части сосуда через другие величины. Имеет ли для этого значение вид газа в частях сосуда?
б) Напишите уравнение, связывающее давления газов в каждой части сосуда с массой поршня и его площадью.
в) Чему равна масса поршня, если $l = 50$ см, $\nu = 0{,}22$ моль, $T = 361$ К, $l_в = 30$ см.

Подсказка. Воспользуйтесь уравнением состояния идеального газа.

3. ПОДЪЁМНАЯ СИЛА ВОЗДУШНОГО ШАРА

Воздушный шар (рис. 46.6) может находиться в воздухе в равновесии только при условии, что действующая на него со стороны воздуха сила Архимеда равна по модулю суммарной силе тяжести, действующей на шар и подвешенный к нему груз:

$$F_{\text{А}} = F_{\text{т.ш}} + F_{\text{т.гр}} . \qquad (3)$$

Рис. 46.6

В случае воздушного шара сила Архимеда равна весу *окружающего* воздуха в объёме, занятом шаром и грузом. Мы выделили слово «окружающего» курсивом, потому что плотность атмосферного воздуха при подъёме изменяется по *двум* причинам: во-первых, уменьшается его давление, во-вторых, понижается его температура.

Обозначим объём шара V. Объёмом груза и оболочки шара обычно пренебрегают по сравнению с объёмом самого шара, но *масса* груза и оболочки шара имеют большое значение! Массу груза обозначим $m_{\text{гр}}$, а массу оболочки — $m_{\text{об}}$. Тогда

$$F_{\text{т.ш}} = (m_{\text{внутр}} + m_{\text{об}})g ,$$

где $m_{\text{внутр}}$ — масса газа, которым наполнен шар.

Обозначим плотность окружающего шар воздуха $\rho_{\text{внеш}}$, а плотность газа, находящегося внутри шара, $\rho_{\text{внутр}}$.

? **21.** Объясните, почему справедливы следующие уравнения:

$$F_{\text{А}} = \rho_{\text{внеш}} gV ,$$

$$m_{\text{внутр}} = \rho_{\text{внутр}} V ,$$

$$V(\rho_{\text{внеш}} - \rho_{\text{внутр}}) = m_{\text{гр}} + m_{\text{об}} . \qquad (4)$$

Подсказка. Воспользуйтесь уравнением (3) и соотношением между массой, объёмом и плотностью.

Подъёмной силой воздушного шара называют вес груза, который может поднять этот шар.

? **22.** Объясните, почему модуль подъёмной силы воздушного шара выражается формулой

$$F_{\text{под}} = Vg(\rho_{\text{внеш}} - \rho_{\text{внутр}}) - m_{\text{об}} g . \qquad (5)$$

Из формул (4) и (5) следует, что *воздушный шар может поднять груз только при условии, что плотность газа, которым наполнен шар, меньше плотности окружающего воздуха.*

Если бы шар был жёстким, этого можно было бы достичь, частично выкачав из него воздух: жесткая оболочка смогла бы выдержать разность давлений воздуха внутри и вне шара. Однако оболочка жесткого шара была бы слишком тяжёлой. Мягкая же оболочка, которую всегда используют для воздушных шаров, не может выдержать сколько-нибудь значительной разности давлений. Поэтому *давление газа внутри шара равно давлению окружающего воздуха.*

? **23.** Объясните, почему если давление внутри шара равно давлению окружающего воздуха, то справедливо равенство

$$\frac{\rho_{\text{внутр}}}{\rho_{\text{внеш}}} = \frac{M_{\text{внутр}} \cdot T_{\text{внеш}}}{M_{\text{внеш}} \cdot T_{\text{внутр}}} . \qquad (6)$$

Подсказка. Воспользуйтесь уравнением состояния идеального газа.

Из формулы (6) видно, что плотность газа, которым наполняют шар, можно сделать меньше плотности окружающего воздуха двумя способами:

— использовать в качестве «внутреннего» газа нагретый воздух;

— использовать газ с меньшей молярной массой.

Первый способ используют для прогулочных воздушных шаров, а второй — для метеорологических зондов (рис. 46.7), которые поднимаются на большую высоту (в таком случае шар наполняют обычно гелием).

Рис. 46.7

? **24.** Объясните, почему из формул (5) и (6) следует, что модуль подъемной силы воздушного шара выражается формулой

$$F_{под} = Vg\rho_{внеш}\left(1 - \frac{M_{внутр} \cdot T_{внеш}}{M_{внеш} \cdot T_{внутр}}\right) - m_{об}g \, .$$

? **25.** Воздушный шар объёмом 3000 м^3 имеет в нижней части отверстие, через которое воздух внутри шара нагревается горелкой до температуры 77° С. Шар находится в равновесии на высоте, где температура окружающего воздуха равна 7° С, а его плотность равна 1,2 кг/м^3. Масса оболочки шара 300 кг. Чему равна масса груза?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

26. В понтон, лежащий на дне озера на глубине 90 м, закачивают сверху воздух (рис. 46.8). При этом вода вытесняется из понтона через отверстие, расположенное в нижней его части. Какой объём *атмосферного* воздуха надо подать в понтон, чтобы он мог поднять груз, если суммарная масса понтона с грузом равна 20 т, а суммарный объём груза и стенок понтона равен 5 м^3? Примите, что температура воды близка к 0 °С, а атмосферное давление равно 10^5 Па.

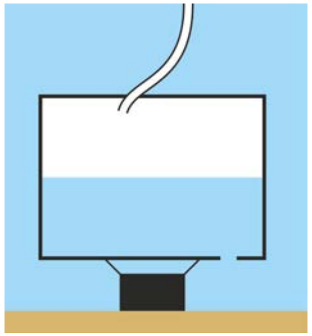


Рис. 46.8

27. В запаянном колене U–образной трубки находится столб воздуха высотой 30 см. Ртуть в обоих коленах находится на одном уровне. Какой станет высота столба воздуха, если медленно долить ртуть доверху? Давление равно нормальному атмосферному давлению.

28. Наполненный гелием шар находится в равновесии в воздухе. Масса одного квадратного метра оболочки шара равна 50 г, температура воздуха и гелия 27 °С, давление равно нормальному атмосферному давлению. Чему равен радиус шара?

§ 47. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ГАЗОВЫМ ПРОЦЕССАМ

1. ИЗОПРОЦЕССЫ И АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Напомним, что согласно первому закону термодинамики количество теплоты Q, переданное газу, связано с изменением внутренней энергии газа ΔU и работой газа $A_г$ соотношением

$$Q = \Delta U + A_г \, . \qquad (1)$$

Часто требуется применять первый закон термодинамики к газовым процессам, представляющим собой последовательность изопроцессов (иногда добавляется еще адиабатный процесс).

Рассмотрим, как находить величины, фигурирующие в формуле (1), в этих процессах. *Напомним, что каждая из этих величин может быть как положительной, так и отрицательной.*

Если график газового процесса задан не в координатах (p, V), то желательно начертить график этого же процесса в координатах (p, V), потому что с помощью этого графика легко найти работу газа. Напомним, что работа газа при расширении численно равна площади под графиком зависимости $p(V)$, а при сжатии газа — площади под тем же графиком, но взятой со знаком «минус».

В большинстве задач на эту тему рассматривается одноатомный идеальный газ. Напомним, что его внутренняя энергия выражается формулой

$$U = \frac{3}{2}\nu RT \, , \qquad (2)$$

где ν — количество вещества (число молей), R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура.

? **1.** Чему равно изменение внутренней энергии газа в изотермическом процессе?

Из формулы (2) и уравнения состояния идеального газа

$$pV = \nu RT \qquad (3)$$

следует, что внутреннюю энергию одноатомного идеального газа можно выразить также формулой

$$U = \frac{3}{2}pV \, . \qquad (4)$$

С помощью этой формулы можно находить изменение внутренней энергии одноатомного идеального газа, если известны начальные и конечные значения давления и объёма газа.

Например, если начальные значения давления и объёма обозначить p_1 и V_1, а конечные — p_2 и V_2, то

$$\Delta U = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)\,. \qquad (5)$$

? **2.** Чему равно изменение внутренней энергии при изохорном процессе, если объём газа равен V, а давление изменилось от p_1 до p_2?

? **3.** Чему равно изменение внутренней энергии при изобарном процессе, если давление газа равно p, а объём изменился от V_1 до V_2?

? **4.** На рисунке 47.1 изображён график зависимости $p(T)$ для ν молей одноатомного идеального газа при изохорном переходе из состояния *1* в состояние *2*. Даны начальные значения давления и температуры газа p_1 и T_1, конечная температура T_2.

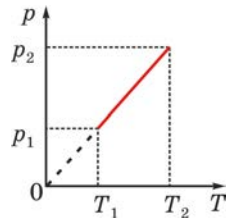


Рис. 47.1

а) Чему равно конечное давление газа p_2?
б) Чему равен объём газа V?
в) Начертите график этого же процесса в координатах (p, V).
г) Чему равна работа газа $A_г$?
д) Чему равно изменение внутренней энергии ΔU газа?
е) Чему равно полученное газом количество теплоты Q?

? **5.** На рисунке 47.2 изображён график зависимости $V(T)$ для ν молей одноатомного идеального газа при изобарном переходе из состояния *1* в состояние *2*. Даны начальные значения объёма и температуры газа V_1 и T_1, конечная температура T_2.

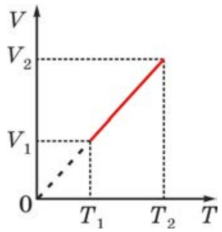


Рис. 47.2

а) Чему равен конечный объём газа V_2?
б) Чему равно давление газа p?
в) Начертите график этого же процесса в координатах (p, V).
г) Чему равна работа газа $A_г$?
д) Чему равно изменение внутренней энергии газа?
е) Чему равно полученное газом количество теплоты Q?

? **6.** Используя результаты предыдущих заданий, сравните значения количества теплоты, полученного одним и тем же количеством вещества газа в изохорном и изобарном процессе при нагревании от температуры T_1 до температуры T_2.
а) В каком случае количество теплоты больше? Во сколько раз больше?
б) Объясните этот результат, используя закон сохранения энергии.

Рассмотрим теперь изотермический и адиабатный процессы.

? **7.** На рисунке 47.3 приведены графики зависимости $p(V)$ для данной массы газа при изотермическом и адиабатном процессах. Какой график описывает адиабатный процесс? Поясните свой ответ.

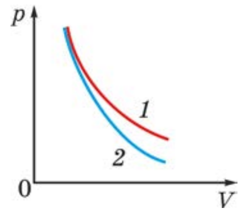


Рис. 47.3

? **8.** В каком случае совершённая газом работа больше: когда он расширяется изотермически или адиабатно? Начальные объёмы газа одинаковы, конечные объёмы тоже одинаковы. Поясните свой ответ.

? **9.** Как связаны полученное газом количество теплоты Q и работа газа $A_г$ при изотермическом процессе?

Нахождение работы газа при изотермическом расширении выходит за рамки школьного курса физики. Но в задачах часто используется связь между Q и $A_г$ в изотермическом процессе, выведенная вами при выполнении предыдущего задания.

? **10.** В вертикальном цилиндре под поршнем массой 1 кг находится идеальный газ. При изотермическом расширении газа поршень поднялся на 5 см. Примите, что трением между поршнем и стенкой цилиндра можно пренебречь.
а) Чему равна работа газа?
б) Чему равно переданное газу количество теплоты?

? **11.** Как связаны работа газа $A_г$ и изменение его внутренней энергии ΔU при адиабатном процессе? (Напомним, что при адиабатном процессе отсутствует теплопередача, то есть $Q = 0$.)

Нахождение работы газа при адиабатном процессе также выходит за рамки школьного курса, но связь между $A_г$ и ΔU при адиабатном процессе в задачах широко используется.

? **12.** При адиабатном расширении 2 молей одноатомного идеального газа газ совершил работу 100 Дж.

а) Как изменилась при этом внутренняя энергия газа?

б) Как изменилась температура газа?

2. ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Циклические газовые процессы состоят из нескольких этапов, причем конечное состояние газа совпадает с начальным. Обычно рассматриваются случаи, когда этапами циклического процесса являются изопроцессы и адиабатный процесс.

Вопросы при этом ставятся, например, такие.

- На каких этапах процесса газ получает тепло, а на каких — отдаёт?
- Чему равно полученное газом или отданное им количество теплоты?
- Чему равно изменение внутренней энергии газа на различных этапах процесса?
- Чему равна работа газа за один цикл?
- Чему равен КПД цикла?

Для простейшего циклического процесса, состоящего из двух изохор и двух изобар мы уже нашли ответы на эти вопросы (см. § 43.). Рассмотрим теперь более сложный цикл.

На рисунке 47.4 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного идеального газа.

На этапе *2–3* газ адиабатно расширяется, а на этапе *3–1* изотермически сжимается.

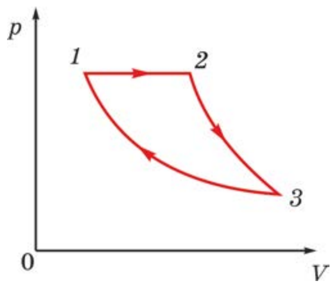


Рис. 47.4

Известно, что при изобарном расширении газ совершает работу A, а при изотермическом сжатии *отдаёт* холодильнику количество теплоты $Q_{хол}$. Требуется найти КПД цикла.

Проанализируем сначала этот циклический процесс *качественно*. По определению КПД цикла равен отношению работы, совершённой газом за один цикл, к количеству теплоты, переданному газу за этот цикл.

Работа, совершенная газом за один цикл, равна разности работы, совершённой *газом* при его расширении, и работы, совершенной *над газом* при его сжатии.

? **13.** На каких этапах процесса газ совершает работу, а на каких этапах работу совершают над газом?

? **14.** На каких этапах процесса газ получает тепло?

Перейдём теперь к количественному описанию. Заметим, что в подобных задачах как работу газа, так и количество теплоты удобно выражать через число молей газа и значения абсолютной температуры газа в различных состояниях газа, даже если эти значения не заданы (в таком случае они сократятся, если найдено правильное решение).

Обозначим T_1, T_2 и T_3 значения абсолютной температуры соответственно в состояниях *1, 2, 3*. Поскольку процесс *3–1* изотермический, $T_1 = T_3$.

? **15.** Рассмотрим сначала изобарный процесс *1–2*.

а) Выразите работу газа через давление p в этом процессе и значения объёмов газа в состояниях *1* и *2*.

б) Выразите эту работу через число молей газа и значения абсолютной температуры в состояниях *1* и *2*.

в) Выразите изменение внутренней энергии газа в процессе *1–2* через число молей газа и значения абсолютной температуры в состояниях *1* и *2*.

г) Выразите количество теплоты, полученное газом в процессе *1–2*, через число молей газа и значения абсолютной температуры в состояниях *1* и *2*.

д) Как связано переданное газу количество теплоты с работой, совершённой газом?

? **16.** Рассмотрим адиабатный процесс *2–3*.

а) Каково соотношение между работой газа в этом процессе и изменением его внутренней энергии?

б) Выразите работу газа в этом процессе через число молей газа и значения абсолютной температуры в состояниях *2* и *3*.

д) Чему будет равно давление p газа, когда поршень будет двигаться равномерно?

е) Какую работу A совершит газ при равномерном перемещении поршня на расстояние d?

ж) На сколько увеличится при этом внутренняя энергия газа по сравнению *с её начальным значением*?

з) Какое количество теплоты Q надо передать газу *в начальном состоянии*, чтобы поршень сдвинулся на расстояние d?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

20. На рисунке 47.6 изображён процесс, происходящий с ν молями одноатомного идеального газа.

а) Начертите график этого процесса в координатах (p, V).

б) Чему равны работа газа, изменение его внутренней энергии и переданное ему количество теплоты в процессе *1–2*? Учтите, что эти значения могут быть отрицательными.

в) Чему равны работа газа, изменение его внутренней энергии и переданное ему количество теплоты в процессе *2–3*?

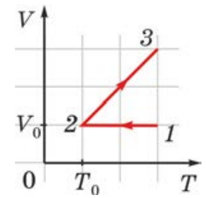


Рис. 47.6

21. На рисунке 47.7 изображён график цикла, происходящего с одноатомным идеальным газом. Найдите КПД цикла.

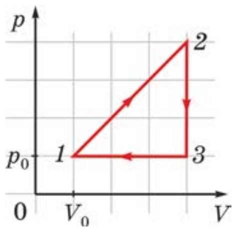


Рис. 47.7

§ 48. ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

1. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ И УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

До сих пор мы рассматривали первый закон термодинамики применительно к газам. Отличительной особенностью газа является то, что его объём может значительно изменяться. Поэтому согласно первому закону термодинамики переданное газу количество теплоты Q равно сумме совершённой газом работы и изменения его внутренней энергии:

$$Q = \Delta U + A_г .$$

В этом параграфе мы рассмотрим случаи, когда некоторое количество теплоты сообщают *жидкости* или *твёрдому телу*. При нагревании или охлаждении они незначительно изменяются в объёме, поэтому совершённой ими при расширении работой обычно пренебрегают. Следовательно, для жидкостей и твёрдых тел первый закон термодинамики можно записать в виде:

$$Q = \Delta U .$$

Простота этого уравнения, однако, обманчива.

Дело в том, что внутренняя энергия тела представляет собой только суммарную кинетическую энергию хаотического движения составляющих его частиц лишь тогда, когда этим телом является идеальный газ. В таком случае, как мы уже знаем, внутренняя энергия прямо пропорциональна абсолютной температуре (§ 42). В жидкостях же и в твёрдых телах большую роль играет *потенциальная* энергия взаимодействия частиц. А она, как показывает опыт, может *изменяться* даже при *постоянной* температуре!

Например, если передавать некоторое количество теплоты смеси воды со льдом, то её температура будет оставаться *постоянной* (равной[28] 0 °С), пока весь лёд не растает. При этом подводимое тепло расходуется на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул: чтобы превратить кристалл в жидкость, необходимо затратить энергию на разрушение кристаллической решётки.

[28] Именно по этой причине температуру таяния льда и приняли в свое время в качестве опорной точки при определении шкалы Цельсия.

Похожее явление происходит и при кипении: если передавать некоторое количество теплоты воде при температуре кипения, её температура будет оставаться постоянной (равной[29] 100 °С при нормальном атмосферном давлении), пока вся вода не выкипит. В этом случае подводимое тепло также расходуется на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул.

Может показаться странным, что потенциальная энергия взаимодействия молекул в паре *больше*, чем в воде. Ведь молекулы газа почти не взаимодействуют друг с другом, поэтому потенциальную энергию их взаимодействия естественно принять за нулевой уровень. Так и поступают. Но тогда потенциальную энергию взаимодействия молекул в жидкости надо считать *отрицательной*.

Такой знак потенциальной энергии взаимодействия характерен для *притягивающихся* тел. В таком случае, чтобы увеличить расстояние между телами, надо совершить работу, то есть *увеличить* потенциальную энергию их взаимодействия. И если после этого она становится равной нулю, значит, до этого она была отрицательной.

Итак, изменение состояния жидкостей и твёрдых тел при сообщении им некоторого количества теплоты надо рассматривать с учётом *возможности изменения их агрегатного состояния*. Изменения агрегатного состояния называют *фазовыми переходами*. Это — превращение твёрдого тела в жидкость (*плавление*), жидкости в твёрдое тело (*отвердевание* или *кристаллизация*), жидкости в пар (*парообразование*) и пара в жидкость (*конденсация*).

Закон сохранения энергии в тепловых явлениях, происходящих с жидкостями и твёрдыми телами, называют *уравнением теплового баланса*.

Рассмотрим сначала уравнение теплового баланса для случая, когда теплообмен происходит между двумя телами, а их теплообменом с другими телами можно пренебречь (на опыте для создания таких условий используют *калориметры* — сосуды, которые обеспечивают теплоизоляцию своего содержимого).

Будем считать (как мы считали ранее для газов) переданное телу количество теплоты *положительным*, если вследствие этого внутренняя энергия тела *увеличивается*, и *отрицательным*,

[29] Потому ее и выбрали в качестве второй опорной точки для шкалы Цельсия.

если внутренняя энергия *уменьшается*. В таком случае уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_1 + Q_2 = 0\,, \qquad (1)$$

где Q_1 — количество теплоты, переданное первому телу со стороны второго, а Q_2 — количество теплоты, переданное второму телу со стороны первого.

Из уравнения (1) видно, что если одно тело *получает* тепло, то другое тело его *отдаёт*. Скажем, если $Q_1 > 0$, то $Q_2 < 0$.

Если теплообмен происходит между n телами, уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n = 0\,.$$

2. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА БЕЗ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Будем считать тело *однородным*, то есть состоящим целиком из одного вещества (например, некоторая масса воды, стальной или медный брусок и т. д.). Рассмотрим сначала случай, когда агрегатное состояние тела не изменяется, то есть фазового перехода не происходит.

Из курса физики основной школы вы знаете, что в таком случае переданное телу количество теплоты Q прямо пропорционально массе тела m и изменению его температуры Δt:

$$Q = cm\Delta t\,. \qquad (2)$$

В этой формуле как Q, так и Δt могут быть как *положительными*, так и *отрицательными* величинами.

Входящую в эту формулу величину c называют *удельной теплоёмкостью* вещества, из которого состоит тело. Обычно в задачах на уравнение теплового баланса используют температуру по шкале Цельсия. Мы тоже будем так поступать.

? **1.** На рисунке 48.1 приведены графики зависимости температуры двух тел от переданного им количества теплоты Q. Масса каждого тела 100 г.

а) У какого тела удельная теплоёмкость больше и во сколько раз?

б) Чему равна удельная теплоёмкость каждого тела?

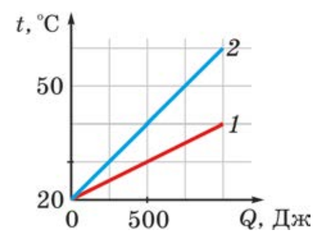


Рис. 48.1

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

9. *Все* размеры воздушного конденсатора уменьшили в 2 раза и затем заполнили пространство между его обкладками диэлектриком.
а) Как изменилась электроёмкость конденсатора вследствие уменьшения его размеров?
б) Чему равна диэлектрическая проницаемость диэлектрика, если после заполнения им пространства между обкладками значение электроёмкости конденсатора стало равно первоначальному?

10. Маленький заряженный шарик подвешен на нити между вертикально расположенными пластинами воздушного конденсатора. Масса шарика 0,2 г, заряд 30 нКл, расстояние между пластинами 5 см. Нить отклонена на угол 30° от вертикали.
а) Изобразите на чертеже все силы, действующие на шарик.
б) Чему равна сила, действующая на шарик в электростатическом поле?
в) Чему равна напряжённость поля между пластинами конденсатора?
г) Чему равна разность потенциалов между пластинами конденсатора?

11. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого равна 7. Заряды пластин конденсатора остаются неизменными. Как изменится при удалении диэлектрика:
а) электроемкость конденсатора?
б) разность потенциалов между его пластинами?
в) энергия конденсатора?

12. Пространство между пластинами воздушного конденсатора заполняют диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε и уменьшают расстояние между пластинами в 2 раза. При этом разность потенциалов между пластинами поддерживают неизменной.
а) Как изменяется электроёмкость конденсатора?
б) Как изменяется заряд конденсатора?
в) Как изменяется энергия конденсатора?

§ 55. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА КУЛОНА И ПРИНЦИПА СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ

1. РАВНОВЕСИЕ ЗАРЯДОВ

Во многих задачах рассматривают равновесие небольших заряженных тел. На то, что их можно рассматривать как *точечные заряды*, указывают обычно такие слова в условии задачи: «небольшие тела», «шарики» (а не шары!), «бусинка» и т. д.

Равновесие двух зарядов

? **1.** Рассмотрим случай, когда шарики подвешены так, как показано на рисунке 55.1. Массы шариков m_1 и m_2, их заряды q_1 и q_2. Длина нити *2* равна l.
а) Изобразите на чертеже силы, действующие на каждый шарик в случае, когда они заряжены одноимённо и разноимённо.
б) Зависит ли сила натяжения нити *1* от зарядов шариков?
в) В каком случае сила натяжения нити *2* больше m_2g: когда шарики заряжены одноимённо или разноимённо?

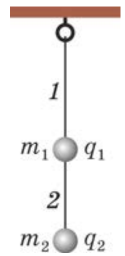


Рис. 55.1

Пусть в одной точке на нитях одинаковой длины подвешены два шарика равной массы m с положительными зарядами q_1 и q_2 (рис. 55.2).


Рис. 55.2

Рассмотрим, при каком условии шарики будут находиться в равновесии в воздухе и в диэлектрике.

Обозначим массу каждого шарика m, а длину нити l. Угол между нитями обозначим 2α (это удобнее при расчётах). Расстояние между шариками, находящимися в равновесии, обозначим r.

Пусть сначала шарики находятся в вакууме (или воздухе).

? **2.** Одинаковы ли углы отклонения нитей от вертикали?

? **3.** Изобразите на чертеже все силы, действующие на один из шариков.

4. Выразите отношение модуля силы электрического отталкивания шариков $F_э$ к силе тяжести $F_т$ через угол α.

Подсказка. Равнодействующая сил, приложенных к любому шарику, равна нулю, когда он находится в равновесии.

5. Выразите r через l и α.

6. Выразите q_1 через через q_2, l, m, α.

Если погрузить шарики в непроводящую жидкость, возникает сразу *два* новых физических явления:

—сила взаимодействия шариков на том же расстоянии между ними уменьшится вследствие поляризации жидкости;

—на шарики будет действовать сила Архимеда.

Рассмотрим сначала *качественно* влияние каждого из этих явлений по отдельности.

7. Как изменится расчётное значение угла между нитями при погружении шариков в диэлектрик, если:

а) учесть только изменение силы взаимодействия шариков?

б) учесть только силу Архимеда?

Ответы на это задание показывают, что одно из этих явлений приводит к *уменьшению* угла между нитями, а другое — к *увеличению*.

8. Обозначим плотность шарика и жидкости $\rho_ш$ и $\rho_ж$ соответственно. При каком соотношении между ε, $\rho_ш$ и $\rho_ж$ угол между нитями не изменится после погружения шариков в диэлектрик?

Равновесие нескольких зарядов

Пусть четыре одинаковых положительных точечных заряда q расположены в вершинах квадрата со стороной d (рис. 55.3). Если они не закреплены, то они не могут находиться в равновесии, потому что все эти заряды отталкиваются друг от друга.

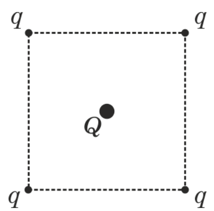


Рис. 55.3

9. Поместим в центр квадрата еще один заряд Q.

а) Будет ли заряд Q находиться в равновесии, если заряды q в углах квадрата закреплены? Зависит ли это от знака и модуля заряда Q?

б) При каком знаке заряда Q заряды q в углах квадрата могут находиться в равновесии, если они не закреплены?

в) Чему равна и как направлена равнодействующая сил, приложенных к одному из зарядов q со стороны *двух ближайших* к нему зарядов q?

г) Чему равна и как направлена сила, действующая на один из зарядов q со стороны наиболее удаленного от него заряда q?

д) Чему равна и как направлена равнодействующая сил, приложенных к одному из зарядов q со стороны *всех* остальных зарядов q?

е) Чему равна и как направлена сила, действующая на один из зарядов q со стороны заряда Q, расположенного в центре квадрата?

ж) При каком соотношении между зарядами q и Q все заряды будут находиться в равновесии? Изменится ли это соотношение, если сторону квадрата увеличить в 2 раза?

Отметим, что равновесие зарядов будет *неустойчивым*. Это — частное проявление общей закономерности: *любая* система электрических зарядов не может находиться в положении устойчивого равновесия под действием *только* электрических сил[11].

Но если на заряженные тела действуют и другие силы, то равновесие тел может быть устойчивым. Например, устойчивым является равновесие двух подвешенных на нитях шариков, рассмотренное ранее в этом параграфе, потому что на каждый заряженный шарик, кроме сил электрического взаимодействия, действуют еще сила тяжести и сила натяжения нити.

Рассмотрим случай, когда несколько зарядов могут находиться в положении устойчивого равновесия.

10. Четыре одинаковых заряда q находятся в вершинах квадрата со стороной d и удерживаются связывающими их нитями (рис. 55.4). Обозначим модуль силы натяжения нити T.

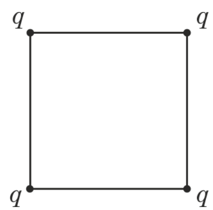


Рис. 55.4

а) Чему равна и как направлена равнодействующая сил, приложенных к одному из зарядов со стороны остальных трёх зарядов?

[11] Доказательство этого факта выходит за рамки нашего курса.

б) Чему равна и как направлена равнодействующая сил натяжения нитей, приложенных к одному из зарядов?
в) Выразите T через q и d .
г) Чему равна сила натяжения нити, если известно, что ближайшие два заряда отталкиваются с силой 2 мН?

2. ПОЛЕ, СОЗДАВАЕМОЕ СИСТЕМОЙ ЗАРЯДОВ

11. Два положительных точечных заряда q находятся на расстоянии $2b$ друг от друга (рис. 55.5).
а) Как направлена напряжённость поля в точке A, равноудалённой от зарядов?
б) Выразите напряжённость поля, создаваемого *одним* из зарядов q в точке A, через q, b и h.
в) Выразите напряжённость поля, создаваемого *обоими* зарядами в точке A, через q, b и h.
г) Найдите *без дополнительных вычислений* напряжённость поля, создаваемого n одинаковыми зарядами q, расположенными в вершинах правильного n-угольника, вписанного в окружность радиуса b, в точке A (рис. 55.6).
д) Найдите *без дополнительных вычислений* напряжённость поля, создаваемого *равномерно заряженным кольцом* радиуса b в точке A, если заряд кольца равен Q (рис. 55.7).

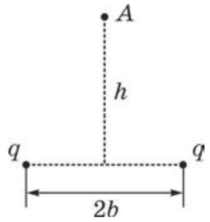


Рис. 55.5

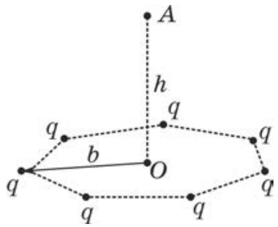


Рис. 55.6

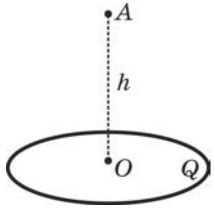


Рис. 55.7

12. Три одинаковых положительных заряда q расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной a.
а) Чему равна напряжённость поля, создаваемого одним зарядом в точке A, расположенной на расстоянии a от каждого заряда?

б) Чему равна напряженность поля, создаваемого всеми тремя зарядами в указанной точке?
Подсказка. Для ответа на этот вопрос найдите расстояние от точки A до плоскости, в которой лежат заряды.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

13. Три шарика массой m каждый с одинаковыми зарядами q подвешены в одной точке на нитях длиной l и находятся в равновесии, когда расстояние между любыми двумя шариками равно a. Длина нити намного больше расстояния между шариками.
а) Выразите равнодействующую сил, приложенных к одному шарику со стороны двух других, через q и a.
б) Выразите расстояние от любого шарика до центра равностороннего треугольника, в вершинах которого расположены шарики, через a.
в) Выразите равнодействующую силы тяжести и силы натяжения нити, приложенных к одному шарику, через m, l и a.
Подсказка. Воспользуйтесь тем, что для малых углов синусы и тангенсы углов приближённо равны.
г) Выразите заряды шариков через m, l и a.
д) Найдите заряды шариков, если $m = 4$ г, $l = 1$ м, $a = 5$ см.

14. Три одинаковых заряда q расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд Q надо поместить в центр этого треугольника, чтобы все четыре заряда находились в равновесии? Будет ли это равновесие устойчивым?

15. Два разноимённых точечных заряда q находятся на расстоянии $2b$ друг от друга (рис. 55.8).
а) Как направлена напряжённость поля в точке A, равноудаленной от зарядов?
б) Выразите напряжённость поля в точке A через q, b и h.

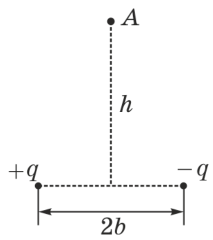


Рис. 55.8

§ 56. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОГО ТЕЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

1. ДВИЖЕНИЕ ВДОЛЬ ЛИНИЙ НАПРЯЖЁННОСТИ

Рассмотрим сначала случай, когда действующей на тело силой тяжести можно пренебречь по сравнению с силой, которая действует на тело со стороны электрического поля. Это всегда имеет место, когда речь идет о движении заряженных *микрочастиц*, например, электронов. Напомним, кстати, что электрон имеет отрицательный заряд, а протон — положительный.

? **1.** Объясните, почему при рассмотрении движения частицы в электрическом поле нельзя пренебрегать *массой* частицы даже в том случае, когда сила тяжести пренебрежимо мала по сравнению с силой, действующей на частицу со стороны электрического поля.

? **2.** Заряженная частица движется в однородном электрическом поле. Что можно сказать о начальной скорости этой частицы, если траектория ее движения — *прямолинейная*?

Рассмотрим, как при таком движении изменяется кинетическая и потенциальная энергия частицы.

? **3.** Электрон движется прямолинейно в однородном электрическом поле из точки с потенциалом 700 В в точку с потенциалом 200 В.

а) Совпадает ли направление начальной скорости электрона с направлением линий напряжённости поля или эти направления противоположны?

б) Как изменилась полная энергия электрона?

в) Чему равно изменение потенциальной энергии электрона?

г) Чему равно изменение кинетической энергии электрона?

д) Какова минимальная начальная скорость электрона?

При движении в электрическом поле заряженная частица может изменить направление движения на противоположное.

? **4.** Электрон влетает в однородное электрическое поле с начальной скоростью $8 \cdot 10^6$ м/с. Потенциал поля в точке, в которую влетает электрон, равен 500 В. Направление начальной скорости электрона совпадает с направлением линий напряжённости поля.

а) До точки с каким минимальным значением потенциала поля долетит электрон?

б) С какой по модулю скоростью электрон вернётся в начальную точку?

в) Чему равна напряжённость поля, если электрон вернулся в начальную точку через $9{,}1 \cdot 10^{-9}$ с?

г) Чему равен путь, пройденный электроном до его возвращения в начальную точку?

Сравним движение в одном и том же поле двух частиц с одинаковыми по модулю зарядами, но с различными массами.

? **5.** Электрон и протон находятся на одной силовой линии однородного электрического поля на расстоянии 1 см друг от друга. Они начинают двигаться из состояния покоя в противоположные стороны.

а) Чему равна напряжённость поля, если через 10^{-8} с расстояние между частицами стало равным 9,8 см?

б) На какое расстояние от своей начальной точки удалился к этому моменту протон?

в) Чему равны в этот момент скорости электрона и протона?

2. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В КОНДЕНСАТОРЕ

Если силой тяжести можно пренебречь по сравнению с силой, действующей на заряженную частицу со стороны электрического поля, то её движение в поле конденсатора будет аналогично движению тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, только роль силы тяжести будет играть сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического поля.

? **6.** По какой траектории будет двигаться заряженная частица в однородном электрическом поле, если её начальная скорость направлена под углом к линиям напряжённости поля?

При рассмотрении тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, мы использовали горизонтально направленную ось координат x и вертикально направленную ось y. В данном случае также удобно ввести оси координат x и y, как показано на рисунке 56.1.

Если начальная скорость частицы направлена *горизонтально*, направление оси y удобно выбрать так, чтобы проекция силы, действующей на эту частицу со стороны электрического поля конденсатора, была положительной. Начало координат совместим с начальным положением частицы.

? **7.** Частица с зарядом q и массой m влетает в электрическое поле плоского конденсатора в точке, находящейся посередине между пластинами (рис. 56.1). Пластины конденсатора расположены горизонтально. Расстояние между пластинами равно d, длина пластин l, напряжение между пластинами U. Начальная скорость частицы равна по модулю v_0 и направлена горизонтально.

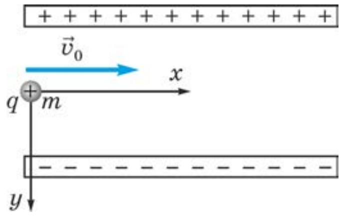


Рис. 56.1

а) Чему равны проекции ускорения частицы на оси координат при её движении внутри конденсатора?
б) Как зависят от времени проекции скорости частицы?
в) Как зависят от времени координаты частицы?
г) Сколько времени частица будет лететь сквозь весь конденсатор, если не столкнется с его пластиной?
д) При каком соотношении между указанными выше параметрами частица пролетит сквозь весь конденсатор и вылетит из него?
е) Чему равен тангенс угла между скоростью частицы и горизонталью в тот момент, когда частица вылетает из конденсатора?
ж) Чему равен модуль скорости частицы, когда она вылетает из конденсатора?

? **8.** Электрон влетает в конденсатор посередине между его пластинами со скоростью, направленной параллельно пластинам. Расстояние между пластинами равно 1 см, длина пластин 10 см. Начальная скорость электрона $5 \cdot 10^7$ м/с.
а) Какова должна быть разность потенциалов между пластинами конденсатора, чтобы электрон не пролетел сквозь весь конденсатор?
б) На какую пластину в таком случае попадёт электрон?
в) На каком расстоянии от положительной пластины будет находиться электрон в момент вылета из конденсатора, если напряжение между его пластинами равно 100 В?

г) Чему в этом случае будет равен тангенс угла между скоростью электрона и горизонталью в момент его вылета из конденсатора?
д) Как в этом случае изменится потенциальная энергия электрона за время его движения в конденсаторе?
е) На сколько процентов увеличится кинетическая энергия электрона за время движения в конденсаторе?

Рассмотрим случай, когда начальная скорость частицы направлена *под углом* к пластинам конденсатора.

Возможные типы траектории движения частицы схематически изображены на рисунке 56.2. Для определённости мы выбрали положительно заряженную частицу.

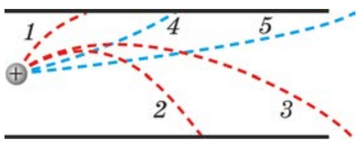


Рис. 56.2

? **9.** Каков знак заряда верхней пластины конденсатора, если положительно заряженная частица движется по одной из траекторий, изображённых красным пунктиром? синим пунктиром?

3. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОГО ТЕЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С УЧЁТОМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Рассмотрим теперь случай, когда надо учитывать не только силу, действующую на тело со стороны электрического поля, но и силу тяжести.

? **10.** Две большие пластины заряженного плоского конденсатора расположены вертикально (рис. 56.3). Разность потенциалов между пластинами равна U, а расстояние между ними равно d. Посередине между пластинами находится шарик с зарядом q и массой m. В начальный момент шарик покоится. Через некоторое время после того, как шарик отпустили, он столкнулся с одной из пластин конденсатора. Направим оси координат, как показано на рисунке.

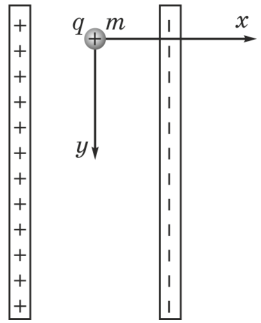


Рис. 56.3

а) Чему равна по модулю сила, действующая на шарик со стороны электрического поля?

ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ

§ 61. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Рассмотрим электрическую схему на рисунке 61.1. Некоторые проводники в ней соединены последовательно друг с другом, а некоторые — параллельно.

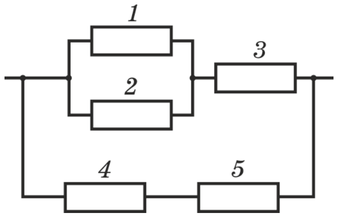


Рис. 61.1

? **1.** Какие проводники в этой схеме соединены последовательно друг с другом? Какие параллельно?

Соединение проводников, при котором часть проводников соединена последовательно друг с другом, а часть — параллельно, называют *смешанным*.

При расчёте сопротивления смешанного соединения часто используют *метод эквивалентного преобразования схем*. При этом данную схему последовательно преобразуют в *более простую, но имеющую такое же сопротивление*.

Например, схему, изображённую на рисунке 61.1, можно преобразовать по следующему плану:

1. Заменить участок цепи с резисторами *1* и *2 одним* резистором с сопротивлением, которое мы обозначим R_{12}.
2. Заменить участок цепи, содержащий резисторы с сопротивлениями R_{12} и R_3, *одним* резистором с сопротивлением, которое мы обозначим R_{123}.
3. Заменить участок цепи с резисторами 4 и 5 *одним* резистором с сопротивлением, которое мы обозначим R_{45}.
4. Заменить участок цепи с резисторами сопротивлением R_{123} и R_{45}, одним резистором. Его сопротивление и будет равно сопротивлению всего участка цепи.

? **2.** В цепи, схема которой изображена на рисунке 61.1, сопротивление каждого резистора, выраженное в омах, примите равным номеру этого резистора. Начертите схемы, соответствующие каждому пункту плана; найдите R_{12}, R_{123}, R_{45} и сопротивление всего участка.

Не всегда с первого взгляда на электрическую схему можно распознать вид соединения проводников.

В таком случае полезно найти *точки с одинаковым потенциалом* (например, соединённые проводами, сопротивление которых в таких задачах считают обычно пренебрежимо малым). Затем надо *перечертить схему*, объединив точки с одинаковым потенциалом.

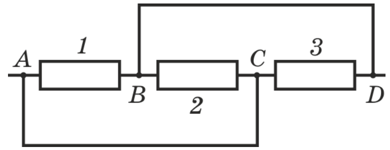


Рис. 61.2

Рассмотрим, например, схему участка цепи, изображённую на рисунке 61.2.

Точки *A* и *C* соединены проводом с пренебрежимо малым сопротивлением, поэтому потенциалы этих точек *равны*. То же можно сказать и о точках *B* и *D*.

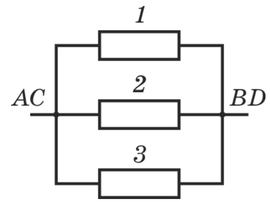


Рис. 61.3

Следовательно, схему можно перечертить, объединив точки *A* и *C* в одну точку (обозначим её *AC*), а точки *B* и *D* объединив в точку *BD*. При этом, согласно исходной схеме, один конец каждого из трёх резисторов соединён с точкой *AC*, а другой — с точкой *BD* (рис. 61.3).

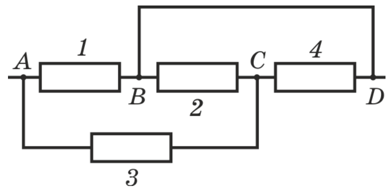


Рис. 61.4

Теперь мы видим, что резисторы соединены *параллельно*.

? **3.** Перенесите в тетрадь рисунок 61.2 и отметьте на нём направление тока в каждом резисторе, считая, что потенциал точки *A* выше потенциала точки *D*.

? **4.** На рисунке 61.4 изображена схема участка электрической цепи. Сопротивление каждого резистора, выраженное в омах, равно номеру резистора. Обратите внимание: потенциалы точек *A* и *C различны*.

а) Перечертите схему, изображённую на рисунке 61.4 так, чтобы легко было распознать вид соединения резисторов.

б) Найдите сопротивление всего участка цепи.

К сожалению, не всякую электрическую схему можно поэтапно упрощать, используя только формулы для последовательного и параллельного соединений. На рисунке 61.5 приведён пример схемы участка цепи, которую нельзя упростить таким образом.

Но для некоторых частных случаев можно найти сопротивление и такого участка цепи уже известными нам способами. Чтобы догадаться, каковы эти случаи, заменим резистор *5* идеальным[14] вольтметром (рис. 61.6).

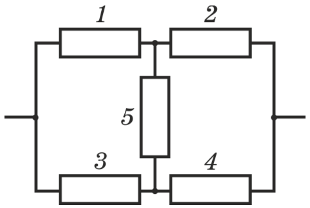


Рис. 61.5

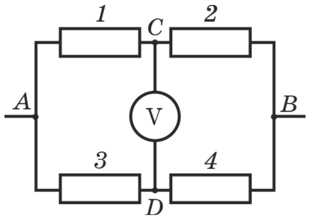


Рис. 61.6

? **5.** Разность потенциалов между точками A и B равна 21 В. Сопротивления резисторов, выраженные в омах, равны их номерам.

а) Чему равна разность потенциалов между точками A и C?

б) Чему равна разность потенциалов между точками A и D?

в) Каковы показания вольтметра?

г) Резистором с каким сопротивлением надо заменить резистор 4, чтобы показания вольтметра были равны нулю?

? **6.** Объясните, почему показания вольтметра будут равны нулю независимо от напряжения между точками A и B, если сопротивления резисторов на схеме, изображённой на рисунке 61.6, удовлетворяют соотношению

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \qquad (1)$$

Схему, изображённую на рисунке 61.6, называют *мостиком Уитстона*. С её помощью можно измерить сопротивление одного из четырёх резисторов, подбирая сопротивления остальных трёх так, чтобы выполнялось соотношение (1).

? **7.** Для сопротивлений резисторов *1–4* в цепи, изображённой на рисунке 61.5, выполняется соотношение (1).

а) Объясните, почему сопротивление данного участка цепи не зависит от сопротивления резистора *5*.

б) Сопротивления резисторов *1* и *3* равны, соответственно, 10 Ом и 15 Ом. Подберите такие значения сопротивлений резисторов *2* и *4*, чтобы сопротивление всего участка было равно 24 Ом независимо от сопротивления резистора *5*.

[14] Напомним, что идеальным считают вольтметр, сопротивление которого можно принять бесконечно большим.

2. МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ

? **8.** К источнику с ЭДС $\mathscr{E}$ и внутренним сопротивлением r подключено внешнее сопротивление R (рис. 61.7).

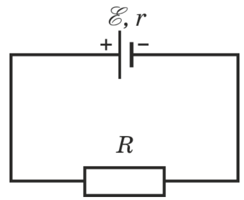


Рис. 61.7

а) Выразите мощность тока во внешней цепи через $\mathscr{E}$, r и R.

б) Используя производную, найдите, при каком R мощность тока во внешней цепи будет *максимальной*.

Эту задачу можно решить и без помощи производной. Для этого надо воспользоваться формулой для мощности тока во внешней цепи

$$P = UI,$$

где U — напряжение на внешнем сопротивлении (напомним, что оно равно напряжению на полюсах источника тока), I — сила тока в цепи.

? **9.** Объясните, почему мощность тока во внешней цепи выражается формулой

$$P = (\mathscr{E} - Ir)I. \qquad (2)$$

Подсказка. Выразите напряжение на полюсах источника через $\mathscr{E}$, I, r, используя закон Ома для всей цепи.

Правая часть равенства (2) представляет собой квадратичную функцию от силы тока I. Графиком её является парабола.

? **10.** Начертите график зависимости $P(I)$ при изменении силы тока I от нуля до максимального значения (равного силе тока при коротком замыкании).

а) При каком значении I достигается максимум функции $P(I)$?

б) Какому сопротивлению внешней цепи соответствует это значение I?

Подсказка. Воспользуйтесь законом Ома для всей цепи.

Итак, *максимальная мощность тока во внешней цепи достигается, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока.*

11. Чему при этом равен КПД источника тока?

3. КОНДЕНСАТОРЫ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Постоянный ток не может идти через конденсатор, потому что между его обкладками находится диэлектрик. Однако между обкладками конденсатора, включённого в цепь постоянного тока, может существовать разность потенциалов, и тогда конденсатор будет заряженным. Начнём с самых простых случаев, когда в цепи, помимо конденсатора, есть только один резистор.

12. На рисунке 61.8 изображена схема электрической цепи. ЭДС источника тока $\mathscr{E} = 12$ В, его внутреннее сопротивление $r = 2$ Ом, сопротивление резистора $R = 10$ Ом, электроёмкость конденсатора $C = 2$ мкФ.

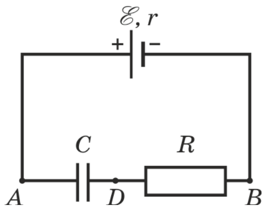


Рис. 61.8

а) Чему равна разность потенциалов между точками A и B?
б) Чему равна разность потенциалов между точками A и D?
в) Чему равен заряд конденсатора?
г) Каков знак заряда обкладки конденсатора, соединённой с резистором?

13. На рисунке 61.9 изображена схема электрической цепи. ЭДС источника тока $\mathscr{E}$, его внутреннее сопротивление r, сопротивление резистора R, электроёмкость конденсатора C.

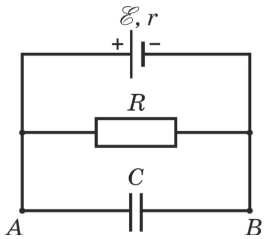


Рис. 61.9

а) Чему равна разность потенциалов между точками A и B?
б) Чему равен заряд конденсатора?

Рассмотрим теперь более сложный случай, когда в цепи есть несколько резисторов, причём они по-разному подключены к конденсатору.

14. В цепи (рис. 61.10) ЭДС источника $\mathscr{E} = 6$ В, его внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом, сопротивления резисторов $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 5$ Ом, $R_3 = 12$ Ом, электроёмкость конденсатора $C = 8$ мкФ.

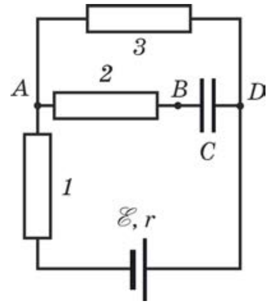


Рис. 61.10

а) Перенесите схему в тетрадь и обозначьте, через какие элементы цепи идёт ток.
б) Какова сила тока в резисторе *3*?
в) Чему равна разность потенциалов между точками A и D?
г) Чему равна разность потенциалов между точками A и B?
д) Чему равно напряжение на конденсаторе?
е) Чему равен заряд конденсатора?
ж) Каков знак заряда обкладки конденсатора, соединённой с резистором *2*?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

15. На рисунке 61.11 изображена схема участка электрической цепи. Сопротивление каждого резистора 1 Ом. Используя метод эквивалентного преобразования схем,
а) начертите схемы последовательного упрощения данной схемы, содержащие меньше резисторов;
б) для каждой схемы рассчитайте её сопротивление и найдите общее сопротивление всего участка.

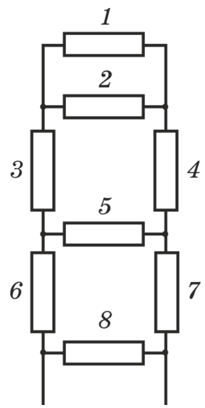


Рис. 61.11

16. На схеме участка цепи, изображённой на рисунке 61.5, сопротивления резисторов $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 50$ Ом, $R_5 = 80$ Ом. Каково общее сопротивление участка цепи?

17. Сопротивление внешней цепи в 4 раза больше того значения, при котором мощность тока во внешней цепи максимальна.
а) Чему равен КПД источника тока?
б) Во сколько раз при этом мощность тока во внешней цепи меньше максимально возможной?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ[1]

1. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Цель работы: измерить ускорение шарика, скатывающегося по наклонному жёлобу.

Оборудование: металлический жёлоб[2], стальной шарик, металлический цилиндр, измерительная лента, секундомер или часы с секундной стрелкой.

Описание работы

Движение шарика, скатывающегося по жёлобу, можно приблизительно считать равноускоренным. При равноускоренном движении без начальной скорости модуль перемещения s, модуль ускорения a и время движения t связаны соотношением $s = at^2/2$. Поэтому, измерив s и t, мы можем найти ускорение a по формуле $a = \frac{2s}{t^2}$. Чтобы повысить точность измерения, ставят опыт несколько раз, а затем вычисляют средние значения измеряемых величин.

Ход работы

1. Положите жёлоб на стол, подложив под один из его концов одну или несколько тетрадей. Изменяя угол наклона жёлоба, добейтесь, чтобы шарик катился по нему достаточно медленно: движение вдоль всего жёлоба должно занимать не менее 3 с.

Положите в жёлоб у его нижнего конца металлический цилиндр. Когда шарик, скатившись, ударится о цилиндр, звук удара поможет точнее определить время движения шарика.

2. Отметьте на жёлобе начальное положение шарика, а также его конечное положение — верхний торец металлического цилиндра.

3. Измерьте расстояние между верхней и нижней отметками на жёлобе (модуль перемещения шарика s) и результат измерения запишите в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

s, м	t, с	$t_{ср}$, с	a, м/с^2

4. Отпустите шарик у верхней отметки без толчка и измерьте время t до удара шарика о цилиндр.

Повторите опыт 5 раз, записывая в таблицу результаты измерений. В каждом опыте пускайте шарик из одного и того же начального положения, а также следите за тем, чтобы верхний торец цилиндра находился у соответствующей отметки.

[1] Лабораторные работы написаны совместно с В. А. Орловым.

[2] Для устойчивости к концам жёлоба можно приклеить кусочки ластика.

5. Вычислите $t_{ср} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$ и результат запишите в таблицу.

6. Вычислите ускорение, с которым скатывался шарик: $a \approx \frac{2s}{t_{ср}^2}$.

Результат вычислений запишите в таблицу.

7. Запишите выводы из эксперимента.

2. ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Цели работы: 1) убедиться на опыте, что тело, брошенное горизонтально, движется по параболе; 2) измерить начальную скорость тела, брошенного горизонтально.

Оборудование: штатив с муфтой и зажимом, изогнутый жёлоб, металлический шарик, лист бумаги, лист копировальной бумаги, отвес, измерительная лента.

Описание работы

Шарик скатывается по изогнутому жёлобу, верхняя часть которого наклонная, а нижняя — горизонтальная (рис. 1). Оторвавшись от жёлоба, шарик под действием силы тяжести движется по параболе. Вершина этой параболы находится в точке, где шарик оторвался от жёлоба.

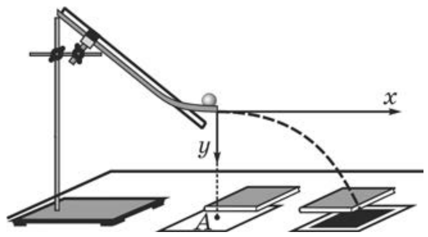


Рис. 1

Выберем систему координат, как показано на рисунке.

При движении по параболе высота h, с которой падает шарик, и дальность полета l связаны соотношением $h = \frac{gl^2}{2v_0^2}$. Отсюда следует, что при одинаковых начальных скоростях отношение высот, с которых падает шарик, должно быть равно отношению квадратов дальности полета.

Измерив h и l, можно найти скорость шарика в момент отрыва от жёлоба по формуле $v_0 = l\sqrt{\frac{g}{2h}}$.

Ход работы

1. Соберите установку, изображённую на рисунке Л-1. Нижний участок жёлоба должен быть горизонтальным, а расстояние h от ниж-

ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ[1]

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ ЧЕЛОВЕКА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИДЕОКАМЕРЫ В КАЧЕСТВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Цели проекта

1. Измерение времени реакции человека на различные виды сигналов.

2. Изучение возможностей использования видеокамеры для измерения перемещения, скорости и ускорения.

Задачи проекта

1. Изучение теоретического материала по данным темам.

2. Изготовление простого измерителя времени реакции человека на различные виды сигналов: визуальный, звуковой, тактильный (прикосновение).

3. Измерение перемещения, скорости и ускорения различных тел с использованием видеосъёмки.

4. Определение характера движения этих тел.

Оборудование

1. Линейка длиной 50 см с миллиметровыми делениями.

2. Видеокамера любительская или телефон с встроенной видеокамерой.

3. Плеер, дающий возможность покадрового просмотра видеофрагментов на компьютере.

4. Принтер.

ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЕКТА

Базовый уровень

1. Время реакции человека — это промежуток времени от сигнала до ответной реакции на сигнал. В данном проекте время реакции человека находят по пути, который проходит тело, свободно падающее без начальной скорости. Рассчитайте, какое расстояние пройдёт это тело за 0,1 с; 0,2 с; 0,3 с.

2. Расположите линейку вертикально нулевой отметкой вниз. Большой и указательный пальцы испытуемого должны находиться у нулевой отметки, не касаясь линейки (рис. 1, *а*).

[1] Все проекты в этом учебнике разработаны совместно с А. И. Фишманом, А. И. Скворцовым, Р. В. Даминовым и А. Ф. Коробковым.

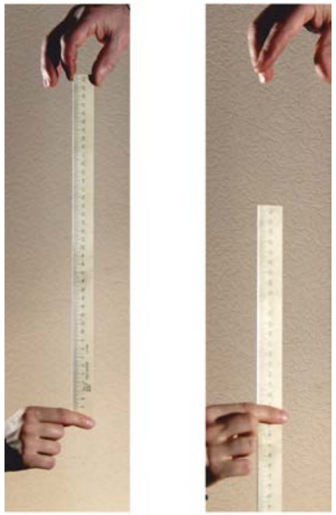
2. Отпустите линейку. Испытуемый должен поймать её, как можно раньше сжав большой и указательный пальцы.

3. Определите, как по отметке, на которой оказались пальцы испытуемого, определить время его реакции (рис. 1, *б*).

4. Изготовьте простейший измеритель времени реакции. Для этого наклейте на линейку бумажную полосу, проградуированную в единицах времени.

5. Измерьте время реакции своих одноклассников и родственников. Запишите данные в таблицу.

6. Найдите зависимость времени реакции человека от его возраста, времени суток, предыдущей физической нагрузки (например, десяти быстрых приседаний).



а *б*

Рис. 1

7. Измерьте время реакции человека на звуковой сигнал и прикосновение.

Углублённый уровень

8. Определите частоту кадров при видеосъёмке для имеющейся видеокамеры. Найдите интервал времени между последовательными кадрами.

9. Укрепите видеокамеру (если возможно, на штативе) и произведите видеосъёмку движущихся тел: тележки и бруска по столу, пешеходов, автомобилей (можно из окна или с балкона). Узнайте размеры этих тел (если возможно, измерьте).

10. Распечатайте последовательные кадры видеосъёмки.

11. По различным *парам* последовательных кадров определите значения скорости движущихся тел. Используйте при этом сведения о размерах тел. Объясните, почему для этого нужны два последовательных кадра.

12. По различным «*тройкам*» последовательных кадров определите значения ускорения движущихся тел. Объясните, почему для этого нужны три последовательных кадра.

Подготовьте презентацию о выполнении проекта.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цели проекта

1. Исследование зависимости сопротивления проводников и полупроводников от температуры.

2. Нахождение практического применения полученных результатов.

Задачи проекта

1. Изучение теоретического материала по данной теме.

2. Установление зависимости сопротивления терморезистора от температуры. Градуировка терморезистора. Измерение с помощью терморезистора температуры различных тел.

3. Нахождение температуры раскаленного проводника.

Оборудование

Источник напряжения, терморезистор типа ММТ (рис. 3), стакан из термостойкого стекла, электроплитка с закрытым термоэлементом, омметр (мультиметр), миллиамперметр, термометр для диапазона температур от 0 °C до 80 °C, две низковольтовые лампочки (одна из них — без колбы: удаление колбы производит взрослый руководитель проекта), ключ, соединительные провода.

Рис. 3

ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЕКТА

Базовый уровень

1. Установите на выключенную плитку стакан с водой. Закрепите терморезистор и термометр, чтобы они находились постоянно в воде *на одной высоте и не касались дна стакана*. Измерьте температуру воды и сопротивление терморезистора.

2. Включите плитку на минимальную мощность и постоянно перемешивайте воду деревянной палочкой. Записывайте значения температуры и сопротивления терморезистора (например, с интервалом 5 градусов).

3. Используя экспериментальные данные, постройте график зависимости сопротивления терморезистора от температуры в диапазоне температур от 0 °C до 80 °C.

4. С помощью полученного графика измерьте температуру различных тел, приводя их в контакт с терморезистором.

5. Соедините приготовленные лампочки последовательно и подключите их к источнику тока с регулируемым напряжением[2]. Подберите такое напряжение, чтобы лампочка с открытой спиралью не светилась, а лампочка с закрытой спиралью светилась. Объясните, почему одна лампочка светится, а другая нет.

6. Подуйте на открытую спираль, а затем погрейте её снизу пламенем. Объясните, почему при этом изменяется накал лампочки с закрытой спиралью.

7. Возьмите терморезистор с сопротивлением около 10 Ом и соедините его последовательно с лампочкой накаливания. Пронаблюдайте, как изменяется накал лампочки при нагревании и охлаждении терморезистора. Объясните наблюдаемые явления.

Углублённый уровень

8. Определите средний термический коэффициент сопротивления терморезистора (ТКС) для разных интервалов температур: от 20 °C до 30 °C и т. д. с интервалом 10 градусов. Постройте график зависимости ТКС от температуры.

9. Определите на опыте, как изменяется сопротивление лампы с закрытой спиралью при увеличении силы тока. Дайте качественное объяснение полученной зависимости.

10. Найдите температуру нити накала лампы, используя то, для металлических проводников сопротивление прямо пропорционально абсолютной температуре: $R = bT$, где b — постоянная величина.

Подготовьте демонстрационный эксперимент «Задуем лампочку». Детали и методику его демонстрации можно найти, загрузив архив «Задуем лампочку» из Единой коллекции цифровых образовательных ресурсов http://school-collection.edu.ru/catalog/rubr/6ff3234e-18e5-11dc-8314-0800200c9a66/110878/? и открыв файл 83.avi.

Подготовьте презентацию о выполнении проекта.

[2] Наблюдать свечение лампы без колбы надо в защитных очках.

Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкина, Г. И. Левиев

Физика

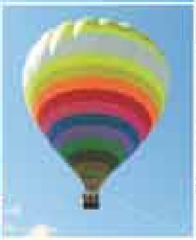
ЗАДАЧНИК

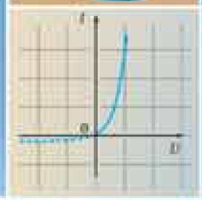
10 КЛАСС

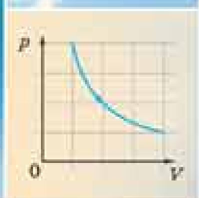
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ

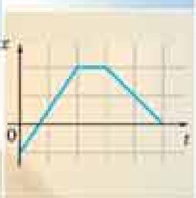
ЧАСТЬ 3

ФГОС









ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА

ФГОС
Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкина
Г. И. Левиев
Физика
ЗАДАЧНИК
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ
10 КЛАСС
ЧАСТЬ 3

§ 2. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Два автомобиля двигались прямолинейно и равномерно: один в течение 10 с, а второй — в течение 15 с. Автомобили прошли одинаковые пути. Какова скорость второго автомобиля, если скорость первого равна 12 м/с?

2. От пункта А до пункта Б легковой автомобиль ехал со скоростью 90 км/ч, а грузовой автомобиль — со скоростью 15 м/с. Сколько времени был в пути грузовик, если легковой автомобиль преодолел это расстояние за 20 мин?

3. Ось x направлена вдоль дороги, по которой едут два велосипедиста. Зависимость координаты x от времени t в единицах СИ для первого велосипедиста выражается формулой $x = 5t$, а для второго — формулой $x = 150 - 10t$. Найдите:

а) время встречи велосипедистов;

б) координату места встречи велосипедистов.

4. Из точек, находящихся на расстоянии 100 м друг от друга, начали одновременно двигаться навстречу друг другу два тела — первое со скоростью 5 м/с, а второе — со скоростью 15 м/с.

а) Напишите формулы, выражающие в единицах СИ зависимость координаты от времени для каждого тела.

б) Начертите графики зависимости координаты от времени для каждого тела.

в) Через какое время тела встретятся?

г) Чему равен модуль перемещения каждого тела до встречи?

5. На рисунке 2.1 изображены графики зависимости координаты от времени для двух тел, движущихся вдоль оси x.

а) Найдите проекции скорости тел.

б) Напишите формулы, выражающие зависимость $x(t)$ для каждого тела.

в) Найдите момент времени и координату точки встречи тел.

г) Найдите пути, пройденные телами до встречи.

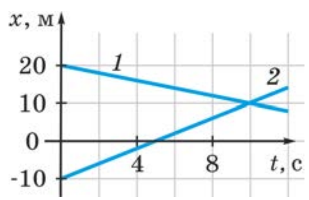


Рис. 2.1

ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ

6. Тело движется в плоскости xOy. Зависимость координат тела от времени в единицах СИ выражается формулами $x = 8 - 3t$, $y = 5 + 4t$.

а) Найдите модуль скорости тела.

б) Найдите модуль перемещения тела за 10 с.

7. На рисунке 2.2 показан график зависимости от времени координаты тела, движущегося вдоль оси x.

а) Постройте график зависимости проекции скорости тела от времени.

б) Постройте график зависимости пройденного телом пути от времени.

в) Найдите проекцию и модуль перемещения тела за первые 2 с движения.

г) Найдите проекцию и модуль перемещения тела за последние 2 с движения.

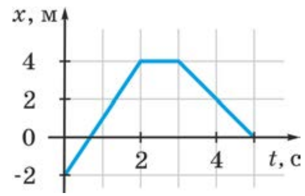


Рис. 2.2

8. На рисунке 2.3 изображён график зависимости координаты от времени для тела, движущегося прямолинейно. Определите путь и модуль перемещения тела за: а) 2 с; б) 3 с; в) 4 с; г) 6 с.

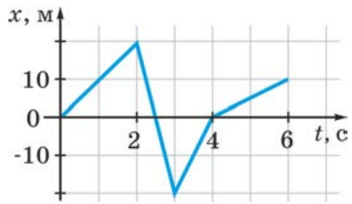


Рис. 2.3

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

9. Начальные координаты материальной точки $x_0 = 0$ м, $y_0 = 20$ м. Она движется прямолинейно и равномерно со скоростью 10 м/с вверх под углом 30^0 к горизонту.

а) Запишите формулы, выражающие зависимость координат x и y материальной точки от времени (в единицах СИ).

б) Запишите уравнение траектории материальной точки в единицах СИ (зависимость $y(x)$).

в) На какую высоту от начального положения поднимется материальная точка за 30 с?

г) Чему равен модуль перемещения материальной точки за 30 с?

10. На рисунке 2.4 изображён график зависимости проекции скорости тела от времени. Начальная координата тела $x_0 = 2$ м.

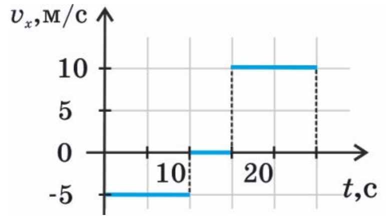


Рис. 2.4

а) Постройте графики зависимости координаты тела и пройденного им пути от времени.

б) Найдите модуль перемещения тела за 10 с.

в) Определите, в какой момент времени перемещение тела было равно нулю.

§ 3. СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ И ПЕРЕХОД В ДРУГУЮ СИСТЕМУ ОТСЧЁТА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВДОЛЬ ОДНОЙ ПРЯМОЙ

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

1. По реке плывёт плот, а по плоту идёт человек (рис. 3.1). Скорость человека относительно плота равна 1,5 м/с, а скорость плота относительно берега равна 1 м/с. Длина плота 30 м.

Рис. 3.1

а) Чему равна скорость человека относительно берега при движении от A к B?

б) Чему равна скорость человека относительно берега при движении от B к A?

в) Чему равно время t_{AB} движения человека от A до B?

г) Чему равно время t_{BA} движения человека от B до A?

д) На какое расстояние переместится плот относительно берега за то время, пока человек пройдёт от A к B?

е) На какое расстояния переместится человек относительно берега за то время, пока человек пройдёт от A к B?

з) На какое расстояние переместится человек относительно берега за то время, пока человек пройдёт от B к A?

2. В море плывёт авианосец длиной 300 м со скоростью 10 м/с (рис. 3.2). Вдоль авианосца начинает двигаться в том же направлении катер со скоростью 20 м/с.

Рис. 3.2

а) С какой скоростью катер движется относительно авианосца?

б) За какое время катер обогнал авианосец?

в) Какова скорость катера относительно авианосца, когда катер движется в обратном направлении?

г) Сколько времени катер находится рядом с авианосцем, когда он движется в обратном направлении?

д) Сколько времени катер будет двигаться от кормы до носа авианосца и обратно?

е) На какое расстояние переместился авианосец, пока катер плыл туда и обратно?

3. Человек бежит со скоростью 5 м/с относительно палубы теплохода в направлении, противоположном направлению движения теплохода. Скорость теплохода относительно берега 54 км/ч. На какое расстояние сместится человек относительно пристани за 10 с?

4. При движении лодки по течению реки её скорость относительно берега равна 10 м/с. А при движении против течения скорость лодки относительно берега равна 6 м/с.

а) Чему равна скорость лодки в стоячей воде?

б) Чему равна скорость течения реки?

5. Самолёт летит из города А в город Б при попутном ветре, а обратно — при встречном. Скорость самолёта относительно воздуха в 10 раз больше скорости ветра. Чему равно отношение времени $t_{АБ}$ полета из А в Б ко времени $t_{БА}$ полета из Б в А?

6. Пловец прыгает с плывущего по реке плота в воду, отплывает от плота на расстояние l, а затем возвращается обратно. Скорость течения $\upsilon_т$, скорость пловца относительно воды перпендикулярна берегу и равна $\upsilon_п$.

а) В течение какого времени пловец удаляется от плота?

б) В течение какого времени пловец приближается к плоту?

в) Через сколько времени пловец вернётся на плот?

ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ

7. Катер плывёт по реке от пристани A к расположенной ниже по течению пристани B и обратно. Расстояние между пристанями l. Скорость течения $\upsilon_т$, скорость катера относительно воды $\upsilon_к$. (рис. 3.3)

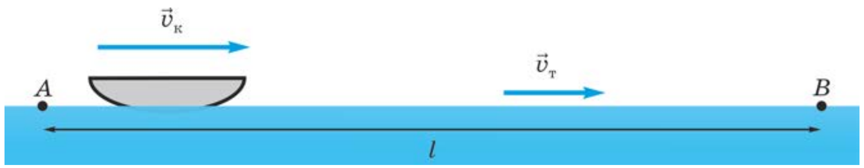


Рис. 3.3

а) Чему равно время t_{AB} движения катера от A до B?

б) Чему равно время t_{BA} движения катера B до A?

в) Чему равно время $t_р$ движения катера по реке туда и обратно?

г) Чему равно отношение времени $t_р$ движения катера туда и обратно по реке ко времени $t_{оз}$ движения катера туда и обратно между двумя пристанями, находящимися на расстоянии l на берегу озера?

8. Лодка обгоняет плывущий по реке плот длиной L. За время обгона лодка сместилась относительно берега на расстояние $s_л$. На какое расстояние $s_п$ относительно берега сместился за это время плот?

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

9. Теплоход проходит расстояние между двумя пунктами на реке вниз по течению за 60 ч, а обратно — за 80 ч. Сколько времени между этими пунктами плывёт плот?

10. Эскалатор поднимает стоящего на нём пассажира за 1 мин. По неподвижному эскалатору пассажир поднимается за 3

мин. За какое время пассажир поднимется по движущемуся вверх эскалатору? .

11. Идя вниз по спускающемуся эскалатору, Миша насчитал за время спуска n ступенек (рис. 3.4). Чему равно отношение скорости $\upsilon_м$ Миши относительно эскалатора к скорости $\upsilon_э$ движения эскалатора, если при спуске по остановившемуся эскалатору надо опуститься на N ступенек?

Рис. 3.4

12. От пункта А к пункту Б по реке отправляется лодка со скоростью 3 км/ч относительно воды. Навстречу лодке одновременно с ней от Б к А отправляется катер со скоростью 10 км/ч относительно воды. За время движения лодки от А к Б катер успевает пройти дважды туда и обратно и прибывает в Б одновременно с лодкой. Какова (по модулю и направлению) скорость течения?

13. По палубе корабля длиной 50 м, плывущего вдоль берега со скоростью 36 км/ч, идёт пассажир со скоростью 1 м/с (рис. 3.5). Пассажир идёт от носа к корме, разворачивается и возвращается в начальную точку. Вместе с пассажиром выбежала собачка, скорость которой в 2 раза больше скорости пассажира. Добежав до кормы, собачка поворачивает обратно и бежит к носу корабля. Так она бегала от одного конца палубы до другого, пока пассажир не возвратился в исходную точку.

Рис. 3.5

а) Чему равен путь, пройденный собачкой относительно корабля?

б) Начертите график зависимости от времени скорости собачки относительно берега.

в) Чему равен путь, пройденный собачкой относительно берега?

Нижняя доска покоится, а верхняя движется со скоростью 5 м/с. Чему равна скорость точки O (центра диска)?

13. Девочка выгуливает собачку, двигаясь со скоростью 1,5 м/с (рис. 8.5). Собачка бегает вокруг девочки на натянутом поводке длиной 5 м, делая один оборот за 26 с. При этом модуль скорости собачки относительно девочки не изменяется. Чему равны наибольшая и наименьшая скорости собачки относительно земли?

Рис. 8.5

14. Определите обусловленные суточным вращением скорость и ускорение точек поверхности Земли, находящихся на широте 30°.

15. С какой скоростью автомобиль должен проезжать середину выпуклого моста, представляющего собой дугу радиусом 100 м, чтобы ускорение автомобиля в этот момент было равно ускорению свободного падения?

16. Через какое время после полудня встречаются минутная и часовая стрелки часов?

17. Скорость точки обода вращающегося колеса в 2,5 раза больше линейной скорости точки, лежащей на 3 см ближе к оси колеса. Чему равен радиус колеса?

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

18. Пропеллер самолёта радиусом 1,5 м вращается с частотой 2000 об/мин. Скорость самолёта 500 км/ч. Определите скорость точки на конце пропеллера. Что представляет собой траектория движения этой точки?

19. Грузовик едет со скоростью 72 км/ч, а за ним с такой же скоростью едет легковой автомобиль. На каком расстоянии друг от друга должны находиться автомобили, чтобы камешек, застрявший между сдвоенными колесами грузовика, оторвавшись, не попал в легковой автомобиль? Высоту точки отрыва камня от колеса не учитывайте.

20. Обруч радиуса r катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности со скоростью v_0. Чему равен модуль a ускорения точки A в момент времени, показанный на (рис8.6)?

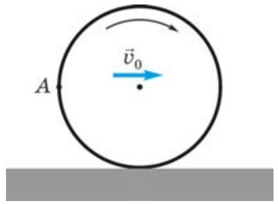


Рис. 8.6

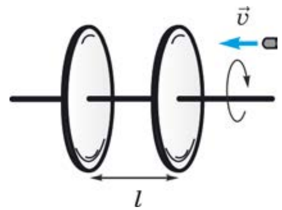


Рис. 8.7

21. Насаженные на общую ось диски расположены на расстоянии 0,5 м друг от друга и вращаются с частотой 1600 об/мин (рис. 8.7). Пуля, летящая вдоль оси на некотором расстоянии от нее, пробивает оба диска. При этом отверстие от пули во втором диске смещено относительно отверстия в первом диске на угол 12^0. Определите скорость пули на участке между дисками.

§ 9. СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ И ПЕРЕХОД В ДРУГУЮ СИСТЕМУ ОТСЧЁТА ПРИ ДВИЖЕНИИ НА ПЛОСКОСТИ

ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ

1. Лодка переплывает реку по кратчайшему пути в системе отсчета, связанной с берегом. Скорость течения реки u , а скорость лодки относительно воды v (причем $v > u$). Чему равен модуль скорости лодки относительно берега?

2. Моторная лодка плывёт из пункта A в пункт B, расположенный на противоположном берегу реки напротив пункта A. Скорость течения реки 5 км/ч, а скорость лодки относительно воды 10 км/ч. Под каким углом α к линии AB должна быть направлена скорость лодки относительно воды?

3. Небольшой самолёт летит из города A в город B при ветре, дующем перпендикулярно линии AB. Скорость самолёта относительно воздуха равна 100 м/с, а скорость ветра 20 м/с. Какова скорость самолёта относительно земли?

4. Теплоход плывёт в море на восток со скоростью $\vec{v}_1$, а танкер плывёт на запад со скоростью $\vec{v}_2$. В начальный момент расстояние между судами равно L. Через промежуток времени t расстояние между судами оказалось минимальным.

а) Изобразите на чертеже взаимное расположение судов в начальный момент.

б) Найдите минимальное расстояние между судами.

5. Лодка должна переправиться на другой берег реки. На переправу по кратчайшему пути требуется 15 мин, а для переправы за кратчайшее время требуется 12 мин. Чему равно отношение скорости течения к скорости лодки относительно воды?

6. Антон и Борис отплывают одновременно из одной точки на берегу реки шириной 400 м на одинаковых лодках. Скорость течения реки составляет 0,6 от скорости лодки относительно воды. Антон проплывает 400 м вдоль берега и возвращается обратно, а Борис доплывает до точки, находящейся на другом берегу напротив начальной точки и возвращается обратно. У кого ушло больше времени на путешествие? Во сколько раз больше?

7. Автомобиль подъезжает к перекрёстку со скоростью 15 м/с. К тому же перекрестку приближается мотоцикл со скоростью 20 м/с. Скорость мотоцикла направлена перпендикулярно скорости автомобиля. Какова скорость мотоцикла относительно автомобиля?

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

8. По реке шириной 300 м плывут лодка и плот. Скорость лодки относительно плота равна 4 км/ч и направлена перпендикулярно берегу. Скорость течения равна 3 км/ч. Найдите:

а) модуль скорости лодки относительно берега;

б) угол между скоростью течения и скоростью лодки относительно берега;

в) время переправы;

г) модуль перемещения лодки относительно берега за время переправы;

д) модуль перемещения лодки относительно плота.

9. Из Москвы до Новосибирска самолёт при боковом ветре пролетел за 4 ч. Обратно при попутном ветре, дующим с той же по модулю скоростью, самолёт летел 3 ч 36 мин. Каково время перелёта в безветренную погоду? Скорость самолёта относительно воздуха остаётся постоянной.

Рис. 9.1

10. Проезжая на мотоцикле точку A, спортсмен должен поразить неподвижную цель B. (рис. 9.1) Скорость мотоцикла 72 км/ч, скорость пули 600 м/с. Под каким углом к линии AB должен целиться спортсмен?

11. Такси и автобус едут к перекрёстку по дорогам, пересекающимся под прямым углом. Скорость такси $v_т$, скорость автобуса $v_а$. Автобус проезжает перекрёсток спустя время t после такси.

а) Чему равен модуль скорости такси относительно автобуса?

б) Чему равно минимальное расстояние между такси и автобусом?

§ 10. «СЕКРЕТЫ» ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ[3]

ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ

1. Автомобиль разгоняется с места в течение 10 с. В конце разгона скорость автомобиля равна 30 м/с. Какова была средняя скорость автомобиля? Какой путь проехал автомобиль?

2. Тело на некоторой планете свободно падало с высоты 100 м без начальной скорости. Какова была средняя скорость во время падения и сколько времени длилось падение, если при ударе скорость тела равна 40 м/с? Чему равно ускорение свободного падения на этой планете?

3. Санки спускались с горы длиной 60 м в течение 20 с. Какова средняя скорость санок? Какова скорость санок в конце спуска? С каким ускорением двигались санки? Начальная скорость санок равна нулю.

4. Поезд, двигаясь равноускоренно, проехал участок 1 км за 1 мин. В начале участка скорость поезда была равна 40 км/ч. Чему равна скорость поезда в конце участка?

5. Автомобиль на участке длиной 30 м разгонялся с ускорением 2 м/с^2. Каковы его начальная и конечная скорость, если он проехал этот участок за 3 с?

6. Электричка проехала от одной станции до другой за 1 мин. Какой была её максимальная скорость, если всё время движения ушло на торможение и разгон, в течение которых

[3] При решении задач этого параграфа неравномерное движение считайте движением с постоянным ускорением.

электричка двигалась равноускоренно, а расстояние между станциями равно 1 км? При разгоне и торможении электричка двигалась с различными по модулю ускорениями.

7. Автомобиль проехал мимо одного километрового столба со скоростью 15 м/с, а мимо следующего — со скоростью 25 м/с. Сколько времени он ехал от одного столба до другого, если он двигался равноускоренно?

8. За первую секунду разгона автомобиль проехал 2 м. Какое расстояние он проехал за пятую секунду разгона, двигаясь с постоянным ускорением? .

9. Вдоль наклонной плоскости длиной 90 см шарик скатился за 3 с. Какой путь проходил шарик за каждую секунду движения? .

10. Автомобиль движется равноускоренно с начальной скоростью. В течение первой секунды он проехал 10 м, а в течение первых двух секунд — 22 м. Какое расстояние он проехал за три секунды?

11. При торможении игрушечный автомобиль проходит за пятую секунду 5 см и останавливается. Какой путь он прошел за третью секунду?

12. За последнюю секунду свободного падения тело пролетело 35 м. Какова скорость тела в момент падения? Сколько времени длилось падение? Какова начальная высота тела?

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

13. Электричка проехала от одной станции до другой за 2 мин. Расстояние между станциями 2 км. При этом половину времени электричка ехала равномерно, а остальное время ушло на разгон и торможение, в течение которых электричка двигалась равноускоренно, но с разными по модулю ускорениями. Какова скорость равномерного движения?

14.Автомобиль тормозит с постоянным ускорением. Средняя скорость автомобиля за первые две секунды торможения в 1,5 раза больше, чем его средняя скорость за следующие две секунды. Через какое время после начала торможения автомобиль остановится?

15. Шарик, свободно падая без начальной скорости, проходит начальный участок пути некоторой длины за время τ, а

конечный участок той же длины — за время τ/n. С какой высоты H падает шарик?

16. За промежуток времени τ непосредственно перед ударом о землю свободно падающий без начальной скорости шарик пролетел расстояние, которое в n раз меньше начальной высоты. Чему равно время t падения шарика?

17. За последнюю секунду свободно падающее без начальной скорости тело пролетело путь, в n раз больший, чем за предпоследнюю.

а) Сколько времени длилось падение?

б) С какой высоты падало тело?

18. За последнюю секунду свободного падения тело пролетело 20 м. Какова скорость тела в момент падения? Сколько времени длилось падение? Какова начальная высота тела?

§ 11. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО И ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ[4]

ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ

1. С вершины крутого обрыва высотой h горизонтально бросают камень. Камень падает на землю на расстоянии l от основания обрыва.

а) Чему равно время движения тела?

б) Чему равна скорость броска?

в) С какой скоростью камень упал на землю?

г) Чему равен тангенс угла между скоростью камня непосредственно перед ударом о землю и вертикалью?

2. Стрелок держит винтовку на высоте 1 м от земли и стреляет горизонтально. Пуля попадает в маленькую мишень, находящуюся на расстоянии 200 м от стрелка. Скорость пули 800 м/с. На какой высоте от земли находится мишень?

3. Самолёт летит горизонтально на высоте H с постоянной скоростью v_1. С самолета нужно сбросить груз на корабль, движущийся встречным курсом со скоростью v_2. На каком расстоянии от корабля по горизонтали лётчик должен сбросить

[4] При решении задач этого параграфа считайте, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.

груз? Скорость груза относительно самолёта в момент сбрасывания равна нулю.

4. Тело брошено горизонтально с высоты h (рис. 11.1). Уравнение траектории тела имеет вид $y = 20 - 0{,}05x^2$. Чему равна дальность полета тела? Какова начальная скорость тела?

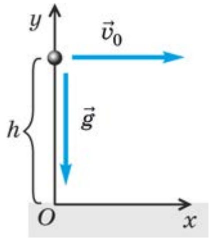


Рис. 11.1

5. Дальность полёта тела, брошенного горизонтально со скоростью 10 м/с, равна высоте, с которой брошено тело. Чему равна эта высота?

6. Камень брошен со скоростью 20 м/с под углом 60^0 к горизонту.

а) Чему равна проекция начальной скорости камня на горизонтально направленную ось x?

б) Чему равна проекция начальной скорости камня на направленную вертикально вверх ось y?

в) Запишите уравнения зависимости $x(t)$ и $y(t)$.

г) Запишите уравнение траектории камня $y(x)$.

д) Сколько времени камень находился в полёте?

е) Чему равна максимальная высота подъема?

ж) Чему равна дальность полета камня?

7. Футбольный мяч лежал на расстоянии 6,4 м от забора. После удара по мячу он перелетел забор, коснувшись его в верхней точке траектории. Какова начальная скорость мяча, если он коснулся забора через 0,8 с после броска?

8. Под каким углом α к горизонту необходимо бросить тело, чтобы максимальная высота подъема была вдвое меньше дальности бросания?

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

9. Стоящий на земле вертикальный цилиндр высотой H заполнен водой. На какой высоте надо сделать отверстие в стенке цилиндра, чтобы дальность полёта вытекающей из отверстия струи воды была наибольшей? Чему она равна? Примите, что начальная скорость струи направлена горизонтально и равна $\sqrt{2gh}$, где h — глубина, на которой сделано отверстие (считая от уровня воды в цилиндре). Понижением уровня воды в цилиндре при истечении воды можно пренебречь.

10. Мяч, брошенный одним игроком другому под углом к горизонту со скоростью 20 м/с, достиг максимальной высоты через секунду после броска. На каком расстоянии находились игроки?

11. Из одной и той же точки с поверхности земли брошены два камня. Первый упал на землю на расстоянии l, а второй — на расстоянии $3l$ от точки бросания. Под каким углом к горизонту был брошен первый камень, если второй камень брошен под углом 30^0, а высоты подъёма у них одинаковы?

12. Мяч брошен со скоростью 22 м/с под углом 60^0 к горизонту.

а) Через какой промежуток времени после броска скорость мяча будет направлена под углом 45^0 к горизонту?

б) Чему равна скорость мяча, когда она направлена под углом 45^0 к горизонту?

в) На какой высоте скорость мяча будет направлена под углом 45^0 к горизонту?

г) На каком расстоянии по горизонтали от точки бросания скорость мяча будет направлена под углом 45^0 к горизонту?

13. Камень, брошенный под углом к горизонту, упал на землю со скоростью 15 м/с. Чему равна максимальная высота подъёма камня, если известно, что во время движения его наибольшая скорость была втрое больше, чем наименьшая?

14. Из шланга бьет струя воды со скоростью 10 м/с под углом 30^0 к горизонту (рис.11.2). Определите массу воды, находящейся в воздухе, если площадь поперечного сечения шланга 3 см^2.


Рис. 11.2

15. На какое максимальное расстояние по горизонтали можно бросить от пола мяч с начальной скоростью 20 м/с в спортивном зале высотой 8 м, чтобы он не ударился о потолок?

16. С башни высотой 25 м брошен камень со скоростью 15 м/с вверх под углом 30^0 к горизонту.

а) Сколько времени камень будет находиться в полёте?

б) На каком расстоянии от основания башни камень упадёт на землю?

в) С какой скоростью камень упадет на землю?

17. Два тела, брошенные с поверхности земли из одной точки с одной и той же по модулю скоростью под разными углами к горизонту, попали в одну и ту же точку на поверхности земли. Первое тело достигло высоты h_1 = 5 м, а второе — высоты h_2 = 20 м.

а) Чему равна сумма углов α_1 и α_2, образованных начальными скоростями тел с горизонтом?

б) До какой высоты h поднялось бы тело, если бросить его с той же начальной скоростью вертикально вверх?

в) Чему равна дальность l полета тел?

г) Чему равна максимальная дальность полета l_{max} с той же начальной скоростью?

§ 12. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ БРОШЕННЫХ ТЕЛ. ОТСКОК ОТ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ[5]

ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ

1. С крыши высокого дома одна за другой упали две капли с промежутком 1 с. Каково расстояние между каплями через 3 с после начала падения второй капли?

2. Яблоко начинает свободно падать с высоты 100 м. В тот же момент из пружинного пистолета, расположенного на поверхности земли, стреляют в яблоко вертикально вверх. Начальная скорость пули 50 м/с. Через какое время после выстрела пуля попадет в яблоко? На какой высоте это произойдет?

3. Шарик брошен вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. В момент, когда он достиг высшей точки, из той же начальной точки с той же начальной скоростью бросили второй шарик. Через какое время и на какой высоте шарики столкнутся?

4. Тело бросили горизонтально со скоростью v_0 со склона, образующего угол α с горизонтом (рис. 12.1).

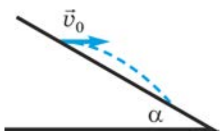


Рис. 12.1

а) Через какой промежуток времени t тело упало на поверхность склона?

б) На каком расстоянии s от начальной точки упало тело?

[5] При решении задач этого параграфа считайте, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.

ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ

5. Яблоко начинает свободно падать с высоты H. В тот же момент из пружинного пистолета, расположенного на поверхности земли на расстоянии L от яблока, стреляют в яблоко под углом к горизонту. Начальная скорость пули v_0. Под каким углом к горизонту надо прицелиться, чтобы попасть в яблоко? При какой скорости пули она сможет попасть в яблоко до его падения на землю?

6. Упругое тело падает с высоты h на наклонную плоскость и отскакивает от неё так, что модуль скорости тела остаётся неизменным, а угол отражения равен углу падения (углы отсчитываются от перпендикуляра к плоскости). Чему равен промежуток времени между первым и вторым ударами? Как это время зависит от угла наклонной плоскости?

7. С высоты 30 м свободно падает стальной шарик. При падении он сталкивается с неподвижной плитой, плоскость которой наклонена под углом 30^0 к горизонту, и взлетает на высоту 15 м над поверхностью Земли. При ударе шарика о плиту модуль скорости шарика не изменился; угол отражения равен углу падения. Чему равно время падения шарика до удара о плиту? На какой высоте над землёй шарик ударился о плиту?

8. Шарик свободно падает на наклонную плоскость без начальной скорости и дважды отскакивает от неё (рис. 12.2). Расстояние между точками первого и второго ударов шарика о плоскость равно s. Угол наклона плоскости α. Считайте, что при каждом ударе шарика о плоскость угол отражения равен углу падения, а модуль скорости шарика не изменяется. Найдите расстояние H, которое пролетел шарик до первого удара о плоскость.

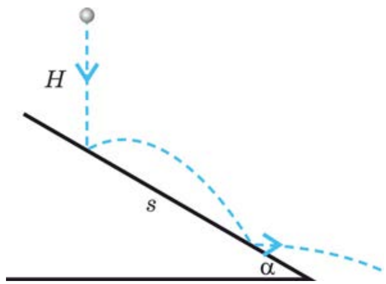


Рис. 12.2

Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик

Физика

11 класс

УЧЕБНИК

БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ

ФГОС
Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик
Физика
УЧЕБНИК
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ
11 класс

Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик
ФГОС
Физика
11 класс
УЧЕБНИК
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА

ОГЛАВЛЕНИЕ

Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкин
Г. И. Левиев

Физика

11 класс

УЧЕБНИК

БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ

ФГОС

Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкин
Г. И. Левиев

Физика

ЗАДАЧНИК
БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ

11 класс

Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкина
Г. И. Левиев

ФГОС

Физика

11 класс

ЗАДАЧНИК

БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВНИ

Издательство Мнемозина

ЕГЭ

шаг за шагом

ФГОС

Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкина

физика

Материалы для КЛАССНОЙ ПОДГОТОВКИ к ЕГЭ

ЕГЭ

ФГОС

ЕДИНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН

Л. Э. Генденштейн
А. В. Кошкина

физика

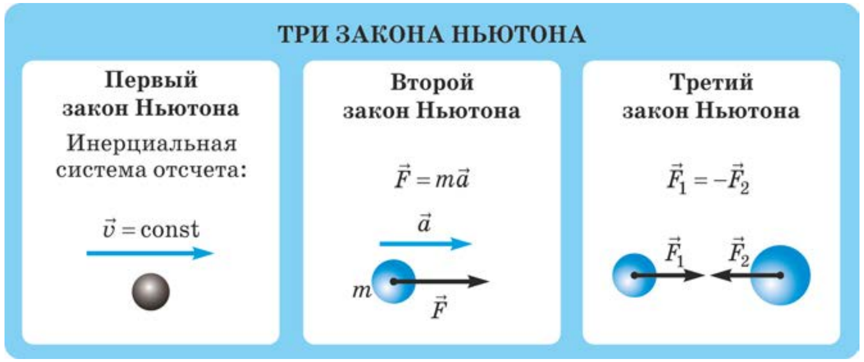
Материалы для классной подготовки к ЕГЭ

ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА

Глава 2. ДИНАМИКА

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Теоретический материал: У-10, § 13.



Базовый уровень

2.1. Почему при встряхивании мокрого зонта с него слетают капли воды?

2.2. К телу приложены две силы, равные по модулю 1 Н и 2 Н. Отвечая на следующие вопросы, сделайте пояснительные чертежи.

а) Какое наименьшее значение может принимать равнодействующая этих сил? Как направлены силы в этом случае?

б) Какое наибольшее значение может быть у равнодействующей этих сил? Как направлены силы в этом случае?

2.3. С какой силой Земля притягивает: а) килограммовую гирю; б) человека массой 60 кг?

Повышенный уровень

2.4. К телу приложены две силы, равные по модулю 3 Н и 4 Н. Может ли их равнодействующая быть равной 5 Н? Если да, то чему в этом случае равен угол между приложенными силами?

2.5. Брусок массой 0,5 кг соскальзывает с наклонной плоскости с углом наклона 30°. Скорость бруска увеличивается. Ускорение бруска равно 2 м/с^2. Изобразите на чертеже *равнодействующую* приложенных к бруску сил. Чему она равна? Есть ли в задаче лишние данные?

2.6. Зависимость координаты x автомобиля от времени выражается в единицах СИ формулой $x = 20 - 10t + t^2$. Ось x направлена вдоль дороги, масса автомобиля 1 т.

а) Чему равна равнодействующая приложенных к автомобилю сил?

б) Как она направлена в начальный момент — в направлении скорости автомобиля или противоположно ей?

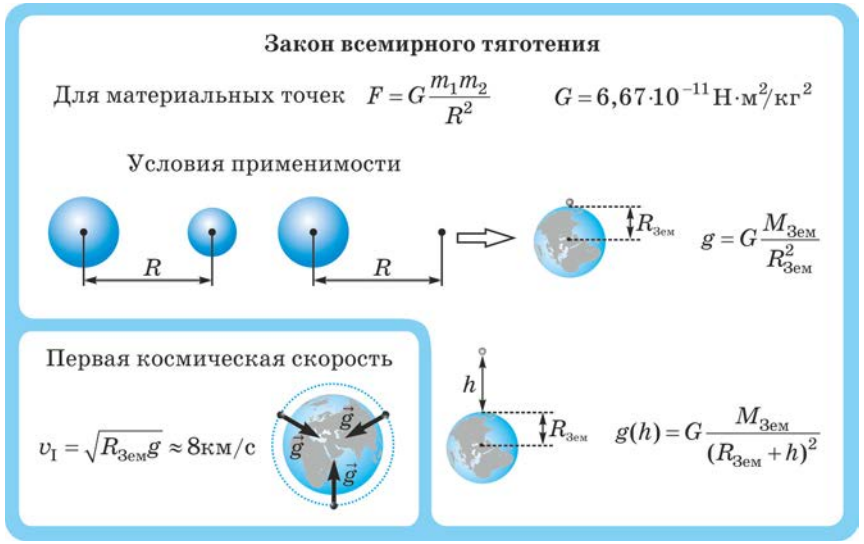
2.7. Два человека тянут в противоположные стороны верёвку с силой 100 Н каждый.

а) Чему равна сила натяжения верёвки?

б) Изменится ли сила натяжения верёвки, если один её конец привязать к дереву, а за другой конец тянуть с силой 100 Н?

ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

Теоретический материал: У-10, § 14, 18.



Базовый уровень

2.8. Как изменится сила притяжения между двумя материальными точками, если расстояние между ними увеличить в 3 раза?

2.9. Две материальные точки массой m каждая притягиваются с силой F. С какой силой притягиваются материальные точки массой $2m$ и $3m$, находящиеся на таком же расстоянии?

Повышенный уровень

2.10. Ускорение свободного падения на поверхности Марса в 2,65 раз меньше ускорения свободного падения на поверхности Земли. Радиус Марса приближенно равен 3 400 км. Во сколько раз масса Марса меньше массы Земли?

2.11. Чему равна первая космическая скорость для Марса? Масса Марса $6,4 \cdot 10^{23}$ кг, а радиус 3400 км.

2.12. Выразите массу планеты M через её радиус R и среднюю плотность ρ.

2.13. Чему равно ускорение свободного падения g на поверхности планеты радиуса R, имеющей среднюю плотность ρ?

2.14. Радиус орбиты Сатурна примерно в 9 раз больше радиуса орбиты Земли. Найдите, чему примерно равна скорость Сатурна, если Земля движется по своей орбите со скоростью 30 км/с?

2.15. Чему равно ускорение свободного падения на высоте над поверхностью Земли, равной её радиусу?

2.16. Оцените, во сколько раз первая космическая скорость для Луны меньше, чем для Земли. Примите, что масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а радиус Луны в 3,7 раза меньше радиуса Земли.

2.17. Чему равно уменьшение веса тела массой m на экваторе шарообразной планеты радиусом R по сравнению с его весом на полюсе, если период обращения планеты равен T?

2.18. Каким должен быть период обращения шарообразной планеты массой M и радиусом r вокруг своей оси, чтобы находящиеся на её экваторе тела находились в состоянии невесомости?

2.19. Чему равна первая космическая скорость для планеты радиусом R и средней плотностью ρ?

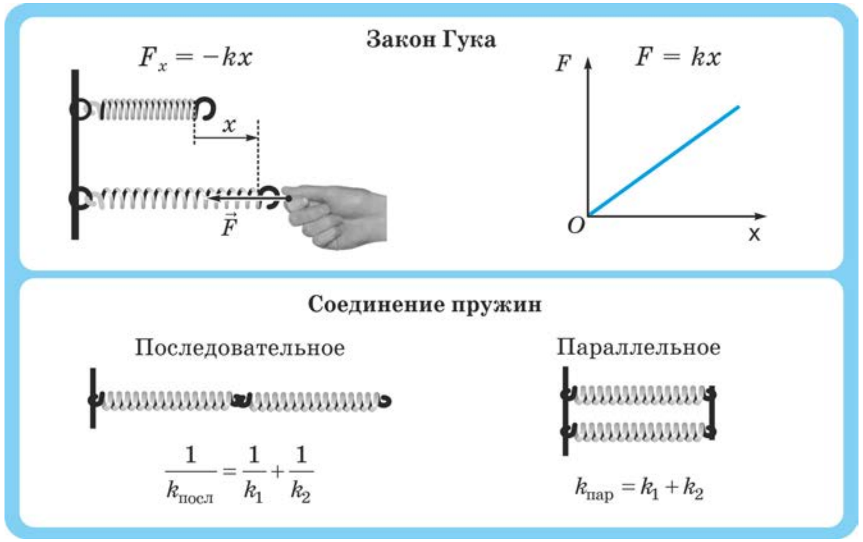
Высокий уровень

2.20. На планете радиусом 3400 км камень падает с обрыва высотой 200 м в течение 10 с. Чему равна средняя плотность планеты? Считайте, что сопротивлением атмосферы планеты можно пренебречь.

2.21. Выразите радиус $r_{\text{гс}}$ геостационарной орбиты через ускорение свободного падения g вблизи поверхности Земли, радиус Земли и продолжительность суток T.

СИЛЫ УПРУГОСТИ

Теоретический материал: У-10, § 15.



Базовый уровень

2.22. На рисунке 2.1 приведены графики зависимости модуля силы упругости от модуля деформации для трёх пружин.

а) У какой пружины наибольшая жёсткость?

б) Чему равна жёсткость самой мягкой пружины?

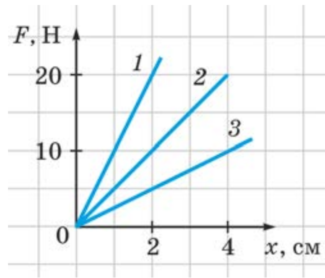


Рис. 2.1

2.23. Груз какой массы надо подвесить к пружине жёсткостью 500 Н/м, чтобы удлинение пружины стало равным 3 см?

Повышенный уровень

2.24. Когда к пружине подвешен груз массой 2 кг, её *длина* равна 14 см, а когда подвешен груз массой 4 кг, длина пружины равна 16 см.

а) Чему равна жёсткость пружины?

б) Чему равна длина недеформированной пружины? .

2.25. Чему равна жёсткость системы двух последовательно соединенных пружин жёсткостью 200 Н/м и 50 Н/м?

2.26. Две пружины жесткостью 200 Н/м и 50 Н/м соединены параллельно. Чему равна жёсткость системы двух пружин?

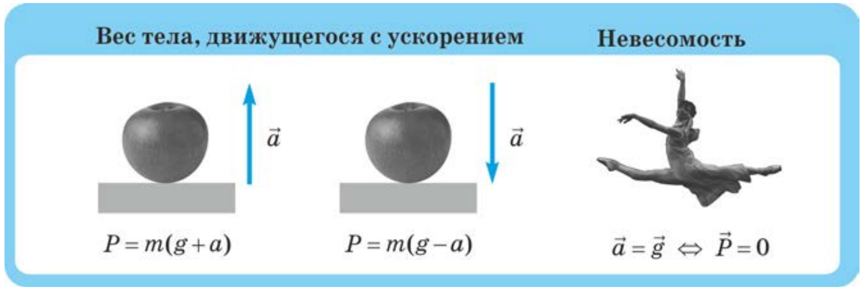
2.27. Тележку массой 500 г тянут по столу с помощью пружины жёсткостью 300 Н/м, прикладывая силу горизонтально. Трением между колёсами тележки и столом можно пренебречь. Чему равно удлинение пружины, если тележка движется с ускорением 3 м/с^2?

Высокий уровень

2.28. Если две пружины соединить параллельно, то жёсткость системы пружин равна 500 Н/м, а если эти же пружины соединить последовательно, то жёсткость системы пружин равна 120 Н/м. Чему равна жёсткость каждой пружины?

ВЕС И НЕВЕСОМОСТЬ

Теоретический материал: У-10, § 16.



Базовый уровень

2.29. Лифт, двигавшийся со скоростью 4 м/с, начал тормозить. Во время торможения с постоянным ускорением вес находящегося в лифте человека массой 50 кг был равен 400 Н.

а) Куда направлено ускорение лифта?
б) Чему равно ускорение лифта?
в) Куда ехал лифт до остановки — вверх или вниз?
г) Чему равна сила натяжения нити в нижней точке?

2.30. Шарик брошен вертикально вверх. В какие моменты он находится в состоянии невесомости: при подъёме, в верхней точке траектории, или когда он падает вниз?

Повышенный уровень

2.31. Подвешенный на нити длиной 1 м груз массой 0,5 кг совершает колебания в вертикальной плоскости (рис. 2.2). В нижней точке скорость груза равна 2 м/с.

а) Как направлено в нижней точке ускорение груза?
б) Чему равно в этой точке ускорение груза?
в) Какова при этом сила натяжения нити?

Рис. 2.2

2.32. Автомобиль массой 1 т едет по выпуклому мосту, имеющему форму дуги окружности радиусом 40 м. Какой должна быть скорость автомобиля в верхней точке моста, чтобы в этой точке:

а) вес автомобиля был равен 2 кН?
б) автомобиль не давил на мост?

2.33. На тележке укреплен штатив, на котором на нити подвешен груз (рис. 2.3). Какой угол α с вертикалью составляет нить, когда тележка движется с ускорением a = 5 м/с^2?

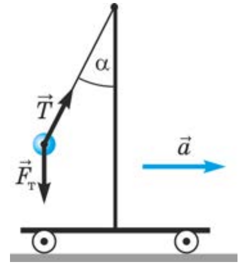


Рис. 2.3

СИЛЫ ТРЕНИЯ

Теоретический материал: У-10, § 17.