Г.И. Левиев
М.Р. Трунин

Учебное пособие

Физика: научись решать задачи сам

Издательский дом
Высшей школы экономики
МОСКВА, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие «Физика: научись решать задачи сам» ориентировано на целенаправленную подготовку к Единому государственному экзамену (ЕГЭ) по физике в школе и дополнительному вступительному испытанию (ДВИ) при поступлении на физический факультет некоторых университетов. Серьезная самостоятельная работа с пособием позволит школьнику не только набрать высокие баллы на ЕГЭ и поступить в желаемый университет, но и плавно перейти к изучению там современного курса физики.

Ежегодно около 15–17% выпускников школ сдают ЕГЭ по физике. Встает вопрос о наиболее эффективной технологии подготовки к ЕГЭ и ДВИ в условиях ограниченного времени. Сегодня имеются рынок репетиторов, множество пособий для подготовки к ЕГЭ по физике, есть сайты в Интернете, где приведены тысячи задач с решениями. Это, безусловно, полезные ресурсы, и их можно использовать в процессе подготовки. Но как научиться самому решать задачи? Ведь умение самостоятельно работать и принимать обдуманные решения — ценное качество, обладатели которого обычно и достигают карьерного успеха. Взявшись за данное пособие, у вас появляется возможность преодолеть неуверенность в собственных силах и научиться быстро решать задачи, в том числе непростые, если следовать предложенной в пособии траектории решения.

Первая часть состоит из пяти глав, включающих 14 тематических блоков, которые охватывают все разделы школьного курса физики. Каждая глава начинается краткой сводкой основных формул и определений, используемых при решении задач по теме. Нумерация формул и определений соответствует порядку следования тем в блоках данной главы. В каждом тематическом блоке содержится несколько десятков стандартных и оригинальных задач, взятых из реальных ситуаций, что позволяет школьнику легко представить себе условие задачи. После каждой задачи приводится только численный ответ. Если этот ответ сразу не получается, нужно заглянуть в раздел «Указания к решению задач», который находится в конце каждой главы. В нем к каждой задаче разбирается физическая ситуация и приводится ссылка на необходимые для ее решения формулы в начале главы (например, «использовать 2-й закон Ньютона в импульсной форме (1.1.4.2)). Таким образом, сначала вы пробуете понять сюжет и физический смысл задачи, потом выстраиваете логику ее решения и переводите эту последовательность мысленных действий на математический язык, ну и в конечном итоге получаете ответ. Если он не сходится с приведенным ответом, сравните ход своих рассуждений и вычислений с предлагаемыми в указании. Такое «почти самостоятельное» решение задач особенно полезно в начале подготовки, когда нужно преодолеть неуверенность в собственных силах. Поскольку в нынешних условиях школьник не может позволить себе роскошь обдумывать задачу слишком долго, если за 20–30 мин ему не удалось найти ответ даже с помощью подсказки в указаниях, тогда уже следует заглянуть во вторую часть пособия, где приведены подробные решения всех задач. Для закрепления полезно также отметить номер задачи, вызвавшей затруднения, и вернуться к ней через одну-две недели.

Для преподавателей физики в школе пособие может быть интересно тем, что в нем обращается внимание на некоторые распространенные ошибки в известных задачниках по физике для школы.

ВВЕДЕНИЕ. ВЕКТОРЫ В ФИЗИКЕ

Векторы как удобная система обозначений и правила работы с ними появились в середине XIX в. Основатели физики — Ньютон, Галилей — не использовали векторы.

Для наших целей можно смотреть на векторы как на отрезки со стрелкой на одном конце, правила обращения с которыми придуманы, как придуманы правила игры в шахматы, например, конь ходит буквой «Г». Разница между этими «придумками» в том, что шахматные правила не используются нигде, кроме шахмат, а правила обращения с векторами отражают поведение физических величин — сил, скоростей, напряженностей полей и упрощают описание физической картины.

Вектор характеризуется длиной отрезка (модулем вектора) и направлением. Два вектора $\vec{A}$ и $\vec{B}$ считаем равными и записываем $\vec{A} = \vec{B}$, если совпадают их модули $A = B$ и направления. Буква со стрелкой обозначает вектор, а та же буква без стрелки — его модуль, положительное число. На рис. В1 модуль вектора $\vec{C}$ равен модулю вектора $\vec{A}$, т.е. $C = A$. Но это не равные векторы, $\vec{C} \neq \vec{A}$, из-за того, что у них разные направления. Вектор $\vec{D}$ направлен, как вектор $\vec{A}$, но его модуль больше, чем модуль вектора $\vec{A}$, и потому $\vec{D} \neq \vec{A}$. Вектор $\vec{E}$, модуль которого такой же, как у вектора $\vec{A}$, а направление противоположное, считаем связанным с $\vec{A}$ соотношением $\vec{E} = -\vec{A}$.

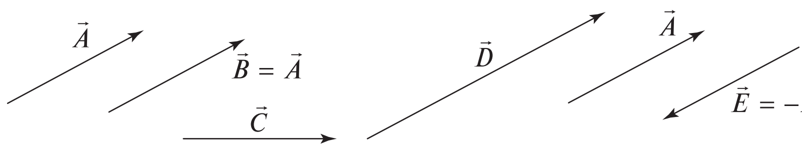


Рис. В1

Сложение векторов

Сформулируем основное правило, благодаря которому векторы находят применение в физике. Вектор $\vec{C}$ называется суммой вектора $\vec{A}$ и вектора $\vec{B}$, $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$, если он построен, как на рис. В2, *а* (правило параллелограмма), или, что эквивалентно, как на рис. В2, *б* (правило треугольника).

а) *б*)

Рис. В2

Вектор $\vec{D}$, равный разности вектора $\vec{A}$ и вектора $\vec{B}$, определяется как сумма вектора $\vec{A}$ и вектора $(-\vec{B})$: $\vec{D} = \vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B})$. Он находится как вторая диагональ параллелограмма, построенного на векторах $\vec{A}$ и $\vec{B}$ (рис. В3). Стрелка вектора разности ставится около вектора-уменьшаемого (правило «уколи уменьшаемое»).

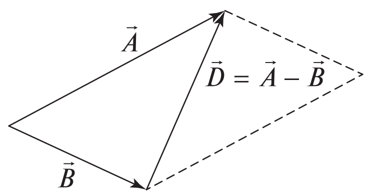


Рис. В3

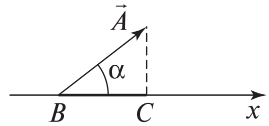
Приведем пример использования векторов в физике. Два трактора равномерно перемещают по земле контейнер с помощью тросов. Угол между тросами $\alpha = 60°$. В тросах имеются встроенные динамометры, которые показывают натяжения тросов 3 кН и 4 кН соответственно. Спрашивается, можно ли заменить два трактора одним, обеспечив такое же перемещение контейнера? И если можно, то как должен быть ориентирован единственный трос от одного трактора и каково натяжение этого троса? Ответ на поставленные физические вопросы дает эксперимент, который показывает, что «работает» правило сложения векторов. То есть нужно представить силы как векторы, направленные вдоль тросов, с модулями 3 кН и 4 кН. Дальше найти результирующий вектор по правилу сложения векторов, т.е. модуль их суммы, равный длине диагонали параллелограмма, и направление вдоль этой диагонали как направление движения троса. Динамометр, встроенный в этот трос, покажет величину натяжения, соответствующую длине диагонали, — около 6 кН, согласно теореме косинусов.

Этот пример показывает, что правило сложения векторов не только соответствует нашему воображению, как правила игры в шахматы, но и подстроено и подогнано так, чтобы описывать реальные эксперименты. Удивительно, что описание с помощью векторов удобно для разных физических величин — сил, перемещений, скоростей, напряженностей электрического и магнитного полей.

О проекции вектора на ось

Пусть имеются вектор $\vec{A}$ и координатная ось x (рис. В4). Векторы, о которых мы говорим, свободные, т.е. их можно перемещать параллельно самим себе. Переместим вектор $\vec{A}$ так, чтобы его начало оказалось на оси x, и опустим перпендикуляр из конца вектора на ось (рис. В5).

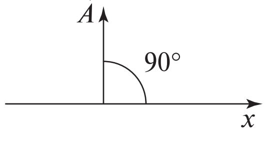
Рис. В4



$A_x = A\cos\alpha > 0$

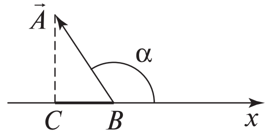
Рис. В5

Проекцией A_x вектора $\vec{A}$ на ось x называют величину $A_x = A\cos\alpha$. Если угол α острый, косинус положительный, величина проекции положительная и равна длине отрезка $BC = A_x$. В случае прямого угла $\alpha = 90°$ проекция вектора на ось обращается в ноль (рис. В6). При углах из интервала $90° < \alpha < 270°$ косинус отрицательный и проекция тоже отрицательная (рис. В7). Во многих задачах приходится брать проекции вектора сразу на две оси, как правило, перпендикулярные друг другу, хотя и не всегда (рис. В8). Иногда удобнее вместо двух проекций, т.е. двух алгебраических чисел, соответствующих данному вектору, представить вектор как сумму двух взаимно перпендикулярных векторов — говорят «разложить вектор на две составляющие».



$A_x = A\cos\alpha = 0$

Рис. В6



$A_x = A\cos\alpha < 0$

Рис. В7

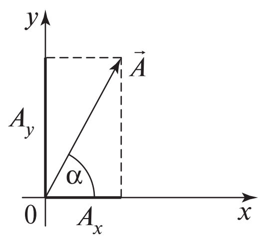


Рис. В8

Например, бывает полезно силу тяжести $m\vec{g}$ тела, лежащего на наклонной плоскости, представить как сумму двух сил: скатывающей силы $\vec{F}_{ск}$, направленной вдоль наклонной плоскости вниз, и силы нормального давления $\vec{N}$, направленной перпендикулярно наклонной плоскости: $m\vec{g} = \vec{F}_{ск} + \vec{N}$ (рис. В9).

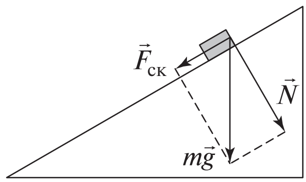


Рис. В9

Умножение векторов

Векторы можно не только складывать и вычитать, но и умножать друг на друга. Мы рассмотрим два способа умножения векторов.

1. **Скалярное произведение векторов.** По определению скалярным произведением двух векторов $\vec{B}$ и $\vec{C}$ называется число A (не вектор, а скаляр), равное произведению модулей векторов B и C и косинуса угла α между векторами:

$$A = \vec{B} \cdot \vec{C} \equiv B \cdot C \cdot \cos\alpha.$$

Из определения видно, что скалярное произведение может быть положительным, отрицательным или равным нулю. В физике с помощью скалярного произведения определяют работу силы. Если при действии на тело постоянной силы $\vec{F}$ оно переместилось на величину $\vec{s}$, то работа A силы при этом перемещении по определению равна $A \equiv Fs\cos\alpha$. Угол α здесь — это угол между векторами $\vec{F}$ и $\vec{s}$.

Скалярное произведение векторов можно выразить не через модули и угол, а через проекции векторов на оси прямоугольной (декартовой) системы координат:

$$A = \vec{B}\vec{C} = BC\cos\alpha = B_xC_x + B_yC_y + B_zC_z.$$

2. **Векторное произведение.** Векторным произведением $\vec{v}$ и $\vec{B}$ называется вектор $\vec{F} = \vec{v} \times \vec{B}$, модуль которого равен произведению модулей v и B и синуса угла α между этими векторами: $F \equiv vB\sin\alpha$. По определению вектор $\vec{F}$ направлен перпендикулярно обоим векторам-сомножителям $\vec{v}$ и $\vec{B}$. При этом, если смотреть со стороны конца вектора-произведения $\vec{F}$,

ближайший поворот от первого сомножителя $\vec{v}$ ко второму сомножителю $\vec{B}$ должен проходить против часовой стрелки (рис. В10).

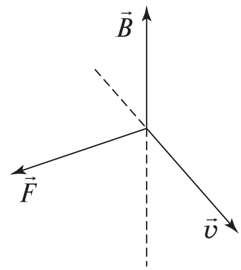


Рис. В10

В физике векторное произведение используется в механике, например, для описания моментов сил и импульсов, в электродинамике, например, для выражения силы Лоренца $\vec{F}_{Л} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$. Если при знакомстве с силой Лоренца не используется представление о векторном произведении векторов, то для указания направления силы Лоренца вводят правило левой руки. Любой вектор $\vec{A}$ можно задать с помощью его проекций на заданную систему координатных осей. В общем случае нужно указать три проекции, но если вектор лежит в плоскости, проведенной через оси координат x, y, то для характеристики вектора хватает двух проекций — A_x, A_y.

В некоторых задачах удобно ввести единичные безразмерные векторы, направленные вдоль осей координат, — орты. Стандартные обозначения ортов: $\vec{i}$ для единичного вектора вдоль оси x и $\vec{j}$ для орта, направленного вдоль оси y (рис. В11). Если используется и третья ось координат z, орт вдоль этой оси обозначается $\vec{k}$.

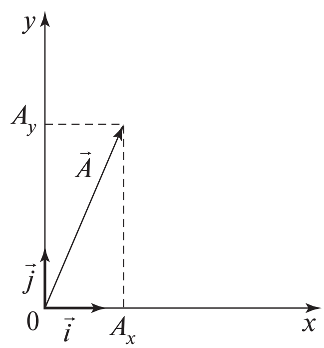


Рис. В11

Произвольные векторы $\vec{A}$, $\vec{B}$ с помощью ортов можно записать так:

$$\vec{A} = A_x\vec{i} + A_y\vec{j}, \quad \vec{B} = B_x\vec{i} + B_y\vec{j}.$$

Найдем скалярное произведение $\vec{A}\vec{B}$ векторов:

$$\vec{A}\vec{B} = (A_x\vec{i} + A_y\vec{j})(B_x\vec{i} + B_y\vec{j}) = A_x\vec{i}B_x\vec{i} + A_x\vec{i}B_y\vec{j} + A_y\vec{j}B_x\vec{i} = A_y\vec{j}B_y\vec{j}. \quad (1)$$

Ответ содержит скалярные произведения ортов $\vec{i}\vec{i}$, $\vec{j}\vec{j}$, $\vec{i}\vec{j}$. Орты перпендикулярны друг другу, поэтому скалярное произведение двух разных ортов равно нулю:

$$\vec{i}\vec{j} = ij\cos 90^\circ = 0. \quad (2)$$

Скалярные «квадраты» ортов, т.е. произведения одинаковых векторов, равны единице:

$$\vec{i}\vec{i} = 1 \cdot 1 \cdot \cos 0^\circ = 1, \quad \vec{j}\vec{j} = 1 \cdot 1 \cdot \cos 0^\circ = 1. \quad (3)$$

С учетом (2), (3) для скалярного произведения (1) имеем

$$\vec{A}\vec{B} = A_xB_x + A_yB_y. \quad (1а)$$

Вывод. Для скалярного произведения векторов получено выражение через проекции векторов (1а). Зная проекции, можно найти скалярное произведение векторов, не рассматривая угол между ними.

Примеры

1. Модули векторов A, B, C на рис. В12 равны 45, 90, 120 соответственно:

а) чему равен модуль вектора $\vec{D}$, равного сумме этих векторов $\vec{D} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C}$?

б) чему равны углы α и β?

в) чему равно скалярное произведение $\vec{A}\vec{C}$ векторов $\vec{A}$ и $\vec{C}$?

г) чему равен модуль вектора $\vec{F}$, равного векторному произведению $\vec{A} \times \vec{C} = \vec{F}$ векторов $\vec{A}$ и $\vec{C}$?

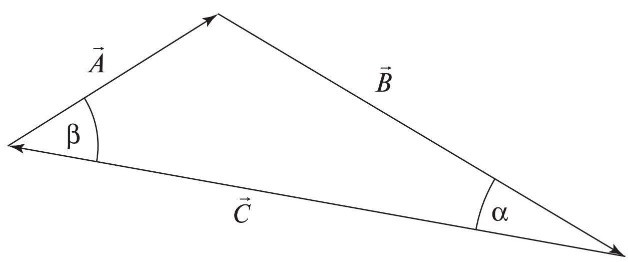


Рис. В12

д) чему равна площадь треугольника, построенного на векторах $\vec{A}$, $\vec{B}, \vec{C}$?

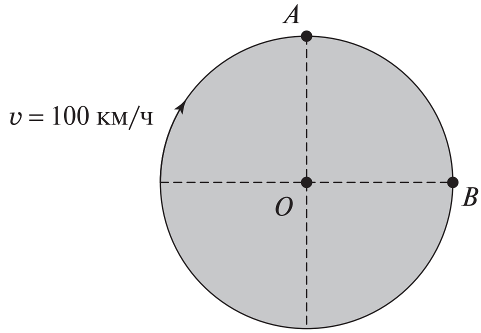


Рис. В13

2. Автомобиль едет по круговой дорожке вокруг стадиона со скоростью $v = 100$ км/ч (рис. В13). Нарисовать вектор разности скоростей $\vec{v}_B - \vec{v}_A$ в точках A и B и вычислить модуль этого вектора.

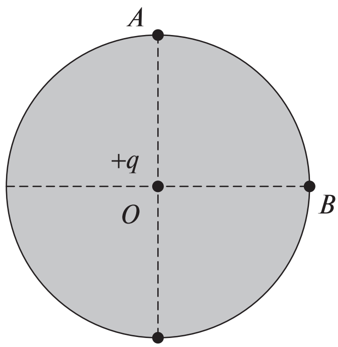


Рис. В14

3. На столе в точке O расположен точечный электрический заряд $+q$ (рис. В14). Нарисовать векторы $\vec{E}_A$, $\vec{E}_B$, $\vec{E}_C$ напряженности поля в точках A, B, C и вектор суммы этих векторов.

4. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка от нас (рис. В15). Электрон и альфа-частица влетают в поле с одинаковыми скоростями $\vec{v}$ в плоскости рисунка. Изобразить векторы сил Лоренца, действующих на электрон и на альфа-частицу.

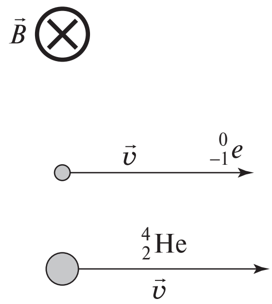


Рис. В15

Часть 1

ЗАДАЧИ
И ПОДСКАЗКИ

1. МЕХАНИКА

1.1. Основные формулы и определения

1.1.1. Кинематика

1.1.1.1. *Систему отсчета* образуют тело отсчета, жестко связанная с ним система координатных осей и часы (рис. 1.1).

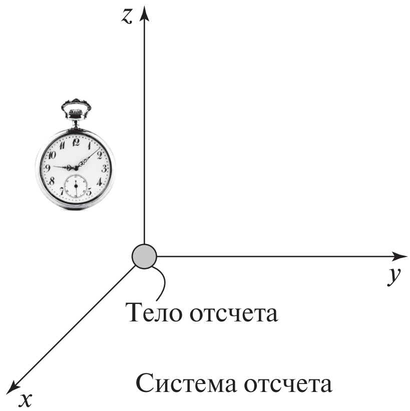


Рис. 1.1

1.1.1.2. Положение тела (материальной точки) в пространстве можно задавать координатами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, или радиус-вектором $\vec{r}(t)$ (рис. 1.2). Разность $\Delta\vec{r} \equiv \vec{s} \equiv \vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)$ называется *перемещением тела* $\vec{s}$.

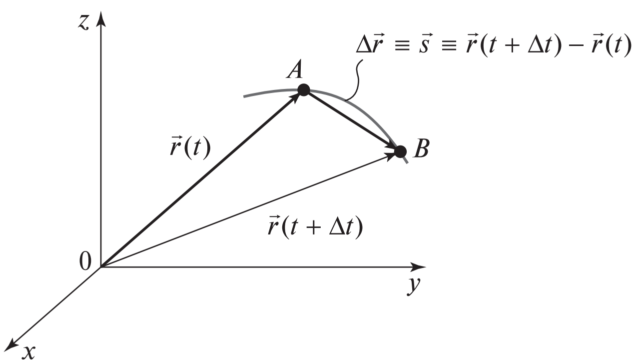


Рис. 1.2

Этой же буквой s часто обозначают *путь тела* — длину пройденного участка траектории. Путь — скалярная положительная величина, со временем может только возрастать или оставаться постоянной, в отличие от модуля вектора перемещения, который может и уменьшаться. Знак тождественности ≡ используется, когда соотношение вводится по определению. *Проекции радиус-вектора тела на оси координат* — это координаты тела $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. При произвольном движении по прямой используется только одна координата, по плоскости — две координаты, в пространстве — три координаты. Зависимость координаты от времени называют *уравнением движения* или *законом движения*. Буквы r, s, v, a без стрелочек над ними означают модули соответствующих векторов, т.е. положительные величины. Проекции векторов могут быть любого знака.

1.1.1.3.

А. *Вектор средней скорости* за промежуток времени Δt:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Мгновенная скорость в момент времени t:

$$\vec{v}(t) = \left.\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}\right|_{\Delta t\to 0} \equiv \vec{r}\,'(t).$$

Средняя путевая скорость, скаляр:

$$v_{\text{ср.путевая}} \equiv \frac{s}{t} = \frac{\text{Весь путь}}{\text{Все время}}.$$

Б. *Классический закон сложения скоростей*:

$$\vec{v}(t)_{\text{абс}} = \vec{v}(t)_{\text{пер}} + \vec{v}(t)_{\text{отн}},$$

где $\vec{v}(t)_{\text{абс}}$ — скорость слона относительно неподвижного наблюдателя; $\vec{v}(t)_{\text{отн}}$ — его скорость относительно подвижной системы (автомобиля); $\vec{v}(t)_{\text{пер}}$ (перенóсная) — скорость подвижной системы (рис. 1.3). Три скорости связаны как радиус-векторы.

Подвижная система считается движущейся поступательно. Если подвижная система вращается, то за перенóсную скорость берем скорость той точки подвижной системы, через которую наблюдаемое тело проходит в данный момент времени.

1.1.1.4. *Среднее ускорение* за промежуток времени Δt:

$$\vec{a}_{\text{ср}} \equiv \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t};$$

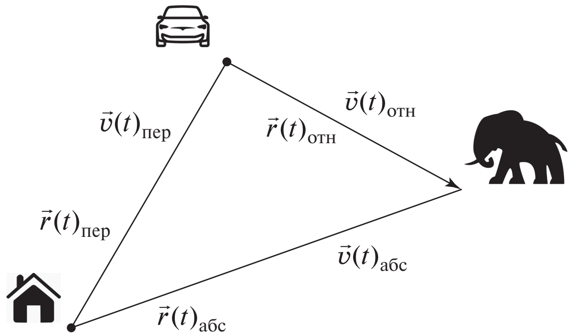


Рис. 1.3

Мгновенное ускорение в момент времени t:

$$\vec{a}(t) \equiv \left.\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}\right|_{\Delta t \to 0} \equiv \vec{v}'(t).$$

Если ускорение $\vec{a}$ не зависит от времени, для скорости $\vec{v}(t)$ и вектора перемещения $\Delta\vec{r}(t)$ справедливы соотношения

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \quad \Delta\vec{r}(t) = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}, \quad v^2 - v_0^2 = 2\vec{a}\cdot\Delta\vec{r}.$$

При движении по прямой в одну сторону

$$v^2 - v_0^2 = 2as,$$

где s — пройденный путь.

Сложение ускорений в случае, когда подвижная система движется поступательно:

$$\vec{a}_{\text{абс}} = \vec{a}_{\text{отн}} + \vec{a}_{\text{пер}}.$$

Если подвижная система вращается, то связь ускорений более сложная. В таком виде она применима для вращающейся системы в частном случае, когда $\vec{v}_{\text{отн}} = 0$.

1.1.1.5. *Равномерное прямолинейное движение* вдоль оси x:

$$x(t) = x_0 + v_x t, \quad v_x = \text{const}, \quad a_x = 0.$$

1.1.1.6.

А. *Прямолинейное движение с постоянным ускорением* a_x вдоль оси x:

$$x(t) = x_0 + v_{x_0} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad v_x(t) = v_{x_0} + a_x t,$$

$$v_x^2 - v_{0_x}^2 = 2a_x(x - x_0), \quad v_{x_{\text{ср}}} = \frac{v_{1_x} + v_{2x}}{2}.$$

Б. *Произвольное прямолинейное движение* вдоль оси x:

$$x = x(t), \quad v_x(t) = x'(t), \quad a_x(t) = v_x'(t) = x''(t).$$

1.1.1.7.

А. *Движение тела, брошенного вертикально вверх или вниз* с высоты h_0. Ось y направлена вверх, начало на земле:

$$y(t) = h_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}, \quad v_y(t) = v_{0y} - gt,$$

$$v_y^2(h) - v_y^2(h_0) = 2g(h_0 - h), \quad s_n = g\tau^2\frac{2n-1}{2} = 5\cdot(2n-1).$$

Тело падает без начальной скорости. s_n = (5 м, 15 м, 25 м, 35 м, ...) — путь, пройденный за n-ю секунду, $\tau = 1$ с.

Б. *Движение тела, брошенного со скоростью $\vec{v}_0$ под углом α к горизонту*. Начало системы координат x, y в точке вылета тела:

$$\vec{r}(t) = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{g}t^2}{2}, \quad \vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \vec{g}t, \quad x(t) = v_0\cos\alpha\cdot t,$$

$$v_x = v_0\cos\alpha, \quad y(t) = v_0\sin\alpha\cdot t - \frac{\vec{g}t^2}{2}, \quad v_y = v_0\sin\alpha,$$

где $\tau = 2v_0\dfrac{\sin\alpha}{g}$ — время полета тела; $L = v_0^2\dfrac{\sin 2\alpha}{g}$ — дальность полета тела; $H = v_0^2\dfrac{\sin^2\alpha}{2g} = L\dfrac{\operatorname{tg}\alpha}{4}$ — максимальная высота при полете.

Уравнение траектории полета (параболы): $y(x) = x\operatorname{tg}\alpha - \dfrac{gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha}$.

Дальность полета тела, брошенного на высоте H:

$$L = v_0^2\frac{\sin 2\alpha}{2g} + v_0\frac{\cos\alpha\sqrt{2gH + v_0^2\sin^2\alpha}}{g}.$$

1.1.1.8. *Движение по окружности.*

Угловая скорость ω тела, движущегося по окружности:

$$\omega \equiv \frac{\Delta\varphi}{\Delta t},$$

где $\Delta\varphi$ — дуга в радианах, которую проходит тело за промежуток времени Δt.

Связь угловой скорости ω с периодом обращения T и частотой вращения ν:

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

Связь линейной скорости тела $\upsilon_{\text{лин}}$ с угловой скоростью ω (или периодом T) и радиусом окружности R, по которой движется тело:

$$\upsilon_{\text{лин}} = \omega R = \frac{2\pi R}{T}.$$

Кинематическая формула центростремительного ускорения $a_{\text{ц}}$ тела, движущегося по дуге окружности радиуса R со скоростью υ:

$$a_{\text{ц}} = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R = \upsilon\omega.$$

Формула одинакова для спутника, камня на веревке, электрона в магнитном поле и т.д.

Модуль тангенциального ускорения a_τ:

$$a_\tau = \frac{\Delta\upsilon}{\Delta t},$$

где $\Delta\upsilon$ — изменение модуля скорости тела, движущегося по окружности, за время Δt.

При равномерном движении по окружности тангенциальное ускорение отсутствует.

1.1.1.9. *Движение твердого тела.*

Теорема о проекции Грасгофа. Проекции скоростей двух произвольных точек твердого тела на ось, проходящую через эти точки, равны между собой (рис. 1.4).

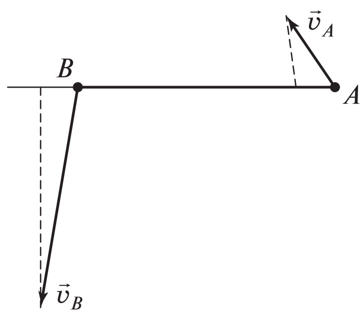


Рис. 1.4

1.1.2. Динамика

1.1.2.1. *Первый закон Ньютона*. Существуют системы отсчета, относительно которых тело, удаленное от всех тел, движется равномерно и прямолинейно.

Такие системы называются инерциальными. Во всех инерциальных системах механические явления протекают одинаково. Это утверждение составляет содержание *принципа относительности Галилея*.

1.1.2.2. Ускорения (модули) взаимодействующих тел обратно пропорциональны их массам:

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

Выбрав массу одного тела за эталон, можно по ускорениям определить массы других тел.

Отношение массы к объему по определению есть плотность вещества:

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

1.1.2.3. *Второй закон Ньютона*. Сила, действующая на тело, движущееся с ускорением:

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

1.1.2.4. Если на тело действуют несколько сил, то ускорение определяется их векторной суммой, называемой *равнодействующей силой* $\vec{F}_\text{р}$: $m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = \vec{F}_\text{р}$.

1.1.2.5. *Третий закон Ньютона*. Тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_{2\to1} = -\vec{F}_{1\to2}.$$

Согласно Ньютону, такой характер взаимодействия имеет место в любой момент времени.

1.1.2.6. *Закон всемирного тяготения Ньютона*. Два точечных тела (или два шара) притягиваются друг к другу с силой $F_\text{Н}$, пропорциональной массам тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния R между центрами тел:

$$F_\text{Н} = \frac{Gm_1m_2}{R^2}.$$

Коэффициент $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2 называется *гравитационной постоянной*, а сама сила притяжения называется *гравитационной силой*.

Гравитационная сила со стороны Земли (и любой планеты) дает основной вклад в силу тяжести $mg = \dfrac{GmM_З}{(R_З + h)^2}$ на любой высоте h. Другой вклад в силу тяжести, обычно намного меньший, дает вращение планеты (центробежная сила).

Закон всемирного тяготения позволяет вывести из динамики *три закона Кеплера*, полученные до его открытия путем наблюдений за планетами.

Первый закон. Планеты движутся по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Второй закон. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.

Третий закон. Квадраты периодов обращений планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит.

1.1.2.7. Связь ускорения свободного падения g на поверхности планеты с массой M, плотностью ρ и радиусом R планеты:

$$g = \frac{F_Н}{m} = G\frac{M}{R^2} = G\frac{4}{3}\pi\rho R = G^*\rho R,$$

где $G^* \equiv \dfrac{4}{3}\pi G = 2{,}7939 \cdot 10^{-10}$ Н·м^2/кг^2.

Первая космическая скорость на планете с ускорением свободного падения на поверхности g:

$$v_1 = \sqrt{Rg}.$$

Для Земли $v_{1З} \approx 8$ км/с.

Вторая космическая скорость:

$$v_2 = \sqrt{2Rg}.$$

Для Земли $v_{2З} \approx 11{,}2$ км/с.

1.1.2.8. *Закон Гука.* Сила упругости $F_{упр}$ пропорциональна величине деформации x:

$$F_{упр} = -kx.$$

Коэффициент k, называемый *жесткостью*, зависит от материала тела и его размеров. Для длинного стержня приближенно жесткость пропорциональна площади сечения и обратно пропорциональна длине: $k \propto \dfrac{S}{l}$ ($\propto$ — знак пропорциональности).

Жесткость комбинированной пружины выражается через жесткости отдельных пружин (рис. 1.5):

$k_{пр} = k_1 + k_2$ при «параллельном» соединении пружин;

$\frac{1}{k_{пс}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \Rightarrow k_{пс} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$ при «последовательном».

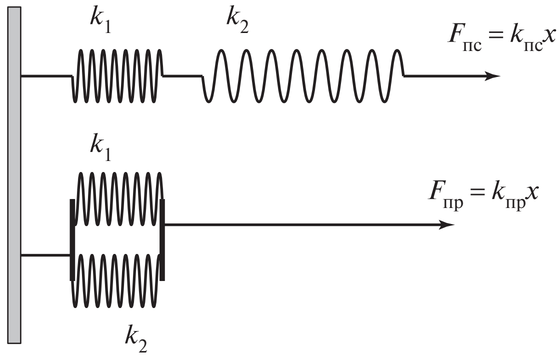


Рис. 1.5

1.1.2.9. Связь силы трения скольжения $F_{тр.ск}$ и силы нормального давления N:

$$F_{тр.ск} = \mu N.$$

Коэффициент трения μ не зависит от скорости скользящего тела.

Сила трения покоя:

$$F_{тр.покоя} \leq \mu N,$$

может быть любой в интервале от нуля до силы трения скольжения μN. В этих пределах сила трения покоя подстраивается под внешние силы, стараясь препятствовать скольжению.

1.1.2.10. Давление p при контактном взаимодействии двух тел:

$$p \equiv \frac{N}{S},$$

где N — сила, с которой тела действуют друг на друга по нормали к поверхности контакта; S — площадь поверхности контакта.

Сила, с которой тело давит на опору или растягивает подвес (вес тела) в лифте, движущемся с ускорением a:

$$\vec{N} = m(\vec{g} - \vec{a}).$$

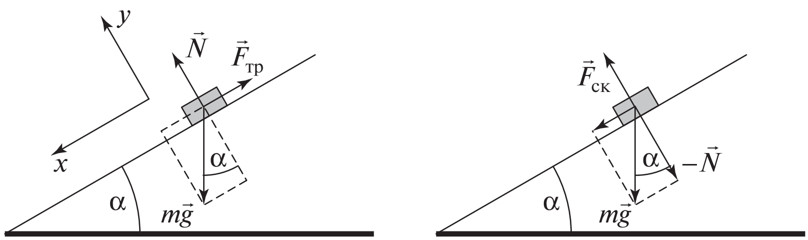
1.1.2.11. На тело, помещенное на наклонную плоскость, действуют три силы: сила тяжести $m\vec{g}$, нормальная реакция плоскости $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{тр}$. Проекции сил на оси *x*, *y* (рис. 1.6, *а*):

$$(mg)_x = mg\sin\alpha, \quad (mg)_y = -mg\cos\alpha, \quad F_{трx} \le \mu mg\cos\alpha.$$

В некоторых случаях удобно представить силу тяжести в виде двух составляющих (рис. 1.6, *б*):

$$m\vec{g} = \vec{F}_{ск} + (-\vec{N}), \quad F_{ск} = mg\sin\alpha, \quad N = mg\cos\alpha,$$

где $\vec{F}_{ск}$ — скатывающая сила, параллельная наклонной плоскости; $(-\vec{N})$ — сила нормального давления тела на плоскость.



а) *б*)

Рис. 1.6

Сила трения на наклонной плоскости:

$$F_{тр} \le \mu mg\cos\alpha.$$

Если коэффициент трения $m > \mathrm{tg}\,\alpha$, тело, помещенное на наклонную плоскость, не скользит вниз.

Ускорение тела, скатывающегося вниз по гладкой наклонной плоскости с углом при основании α:

$$a = g\sin\alpha.$$

Сила, которую надо приложить вдоль наклонной плоскости, чтобы перемещать тело равномерно вверх по плоскости:

$$F_{\uparrow} = mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha.$$

1.1.2.12. Сила инерции: $\vec{F}_{и} = -m\vec{a}$, $m\vec{a}_{отн} = \vec{F}_{р} + \vec{F}_{и}$. Если система отсчета движется с ускорением *a* по отношению к инерциальной системе отсчета, то такая система является неинерциальной (например, поезд, идущий с ускорением). Чтобы описывать движение относительно такой системы с помощью 2-го закона Ньютона (например, маятника в поезде), нужно считать, что на тело, кроме «обычной» равнодействующей силы $\vec{F}_\text{р}$, действует дополнительная сила инерции $\vec{F}_\text{и} = -m\vec{a}$.

1.1.3. Статика

1.1.3.1. *Равнодействующая сила* $(\vec{F}_\text{р})$ — сумма сил, действующих на тело:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_1 + \ldots + \vec{F}_n = \vec{F}_\text{р}.$$

Если тело точечное, то под действием одной равнодействующей тело движется поступательно так, как под действием всех сил. В случае тела конечных размеров, кроме поступательного движения, возможно вращательное. Чтобы обеспечить правильное движение, включая вращательное, равнодействующая должна быть приложена в определенной точке протяженного тела.

Равнодействующая существует не для любой системы сил. Пару сил, т.е. две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$, приложенных в разных точках тела, нельзя заменить одной так, чтобы воздействие на тело не изменилось.

1.1.3.2. Условие равновесия материальной точки:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_1 + \ldots + \vec{F}_n = \vec{F}_\text{р} = 0.$$

1.1.3.3. Момент M силы F относительно оси равен произведению модуля силы на расстояние l от оси до линии действия силы (l — плечо силы):

$$M \equiv F \cdot l.$$

Если сила вращает против часовой стрелки, ее момент считают положительным, по часовой стрелке — отрицательным.

1.1.3.4. Условия равновесия тела конечных размеров:

1) $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = 0;$

2) $M_1 + M_2 + \ldots + M_n = 0.$

Условие 1 обеспечивает отсутствие поступательного движения, условие 2 — вращательного. Предполагается, что все векторы сил лежат в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Если ось закреплена, то условие 1 выполнено автоматически за счет сил, приложенных к оси.

1.1.3.5. *Теорема о трех силах.* Если твердое тело конечных размеров находится в равновесии под действием трех непараллельных сил, лежащих в одной плоскости, то линии действия этих сил пересекаются в одной точке (рис. 1.7).

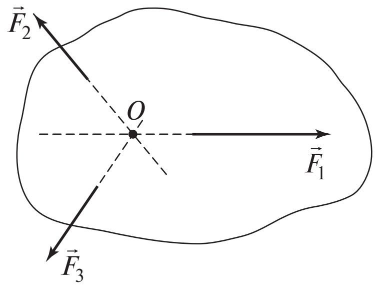


Рис. 1.7

1.1.3.6. Координата центра тяжести (ЦТ) $x_{ЦТ}$ системы материальных точек массами $m_1, m_2, ..., m_n$:

$$x_{ЦТ} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + ... + m_nx_n}{m_1 + m_2 + ... + m_n},$$

где $x_1, x_2, ..., x_n$ — координаты точек. В ЦТ приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные частицы системы.

Аналогичная формула для y-координаты ЦТ и z-координаты. Формулы применимы и для ЦТ системы шаров.

1.1.3.7. *Давление жидкости* p равно отношению силы давления F, действующей на поверхность со стороны жидкости, к площади S этой поверхности:

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

Закон Паскаля. Давление, производимое на покоящуюся жидкость или газ, передается в любую точку жидкости одинаково по всем направлениям (рис. 1.8). То есть если в данной точке жидкости вращать манометр, из-

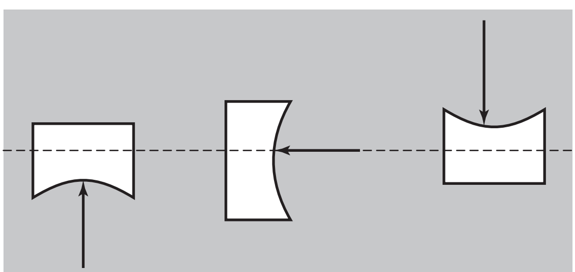


Рис. 1.8

меряя давление в разных направлениях, показания прибора будут одинаковыми.

1.1.3.8. Давление p столба жидкости под действием силы тяжести:

$$p = \rho g h,$$

где ρ — плотность жидкости; h — высота столба.

1.1.3.9. *Закон Архимеда*. На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила Архимеда F_A, равная весу жидкости объема, равного объему погруженной в жидкость части тела:

$$F_A = \rho g V,$$

где ρ — плотность жидкости; V — объем погруженной части тела; g — ускорение свободного падения.

Закон применим и к газам.

1.1.3.10. *Условия плавания тел*:

$$1)\ F_A > mg,\ 2)\ F_A = mg,\ 3)\ F_A < mg,$$

где F_A — сила Архимеда при полном погружении тела в жидкость; 1 — тело плавает, частично погрузившись в жидкость; 2 — тело в равновесии на любой глубине; 3 — тело тонет.

1.1.3.11. Вес P тела массой m при погружении его в жидкость плотности $\rho_ж < \rho_{тела}$:

$$P = mg - F_A = (\rho_{тела} - \rho_ж)Vg,$$

где V — объем погруженной части тела.

1.1.3.12. *Расход жидкости или газа*:

$$\Delta V = \upsilon S \Delta t,\ \Delta m = \rho \upsilon S \Delta t.$$

Жидкость (или газ) плотности ρ течет со скоростью υ по трубе сечением S. За время Δt из трубы вытечет объем жидкости ΔV массой Δm.

1.1.3.13. *Формула Торричелли*:

$$\upsilon^2 = 2gh.$$

Жидкость находится в тонкостенном сосуде. На глубине h от поверхности имеется небольшое отверстие. Жидкость вытекает из него со скоростью υ, такой же, как у тела, падающего с высоты h.

1.1.4. Законы сохранения

1.1.4.1. *Определение импульса тела* $\vec{p}$. Вектор, модуль которого равен произведению массы тела на модуль скорости, а направление совпадает с направлением вектора скорости:

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

1.1.4.2. *Второй закон Ньютона в импульсной форме*:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.$$

Изменение импульса тела $\Delta\vec{p}$ равно импульсу приложенной силы $\vec{F}$.

Импульсом силы называется произведение $\vec{F}\Delta t$. При неизменной массе тела такая форма 2-го закона Ньютона совпадает с использованной ранее $m\vec{a} = \vec{F}$.

1.1.4.3. *Полным импульсом* $\vec{P}_{\text{пол}}$ системы частиц называется вектор, равный сумме импульсов отдельных частиц:

$$\vec{P}_{\text{пол}} \equiv \sum \vec{p}_i \equiv \sum m_i\vec{v}_i.$$

1.1.4.4. *Изменение полного импульса* системы тел $\Delta\vec{P}_{\text{пол}}$ за время Δt определяется импульсом только внешних сил $\vec{F}_{\text{внш}}$:

$$\Delta\vec{P}_{\text{пол}} = \vec{F}_{\text{внш}}\Delta t.$$

Если внешних сил нет, то полный импульс системы тел не изменяется со временем:

$$\vec{P}_{\text{пол}} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \ldots + m_n\vec{v}_n = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2' + \ldots + m_n\vec{v}_n'.$$

1.1.4.5. Координата центра масс (ЦМ):

$$x_{\text{ЦМ}} \equiv \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \ldots + x_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n},$$

где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — координаты отдельных точечных тел (или шаров).

Координаты $y_{\text{ЦМ}}$, $z_{\text{ЦМ}}$ находятся аналогично.

1.1.4.6. Проекция скорости центра масс:

$$v_{\text{ЦМ}x} \equiv \frac{m_1v_{1x} + m_2v_{2x} + \ldots + m_nv_{nx}}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} = \frac{P_{\text{пол}x}}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n},$$

где $v_{1x}, v_{2x}, \ldots, v_{nx}$ — проекции скоростей отдельных частиц массами m_1, $m_2, \ldots, m_n$; $P_{\text{пол}.x}$ — проекция полного импульса системы.

Если проекция внешней силы на ось x равна нулю, проекция $v_{\text{ЦМ}x}$ не изменяется. В частности, если при отсутствии проекции внешней силы на ось x ЦМ в начальный момент покоился, то он остается неподвижным все время.

1.1.4.7. Механическая работа A, производимая постоянной силой $\vec{F}$ над материальной точкой при ее перемещении $\vec{s}$:

$$A \equiv Fs\cos\alpha = \vec{F}\cdot\vec{s} = \vec{F}\cdot\vec{v}\cdot\Delta t,$$

где α — угол между вектором силы и вектором перемещения точки; $\vec{v}$ — скорость точки.

Полная работа $A_{\text{пол}}$ над системой материальных точек по определению равна сумме работ над отдельными точками:

$$A_{\text{пол}} \equiv \sum_i A_i.$$

1.1.4.8. Мощность N силы есть отношение работы силы к интервалу времени Δt, за которое эта работа была произведена:

$$N \equiv \frac{A}{\Delta t}.$$

1.1.4.9. Сила $\vec{F}$, действующая на тело в направлении вектора скорости $\vec{v}$, развивает мощность N:

$$N = F\cdot v.$$

1.1.4.10. Кинетическая энергия $E_{\text{кин}}$ тела массы m, движущегося со скоростью $\vec{v}$:

$$E_{\text{кин}} \equiv \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = \frac{p^2}{2m},$$

где $p = mv$ — модуль импульса тела.

Формула для кинетической энергии применима при поступательном движении тела, когда скорость у всех частиц тела одинаковая. Для нескольких поступательно движущихся тел общая кинетическая энергия равна сумме энергий отдельных тел:

$$E = \sum_i \frac{m_i v_i^2}{2}.$$

1.1.4.11. *Теорема об изменении кинетической энергии.* Изменение кинетической энергии системы равно работе всех внутренних и внешних сил, действующих на тела системы:

$$E_{\text{кин}1} - E_{\text{кин}0} = \sum_i A_i.$$

1.1.4.12. Упругое центральное столкновение двух шаров массами m_1, m_2:

$$u_{1x} = \frac{(m_1 - m_2)v_{1x} + 2m_2 v_{2x}}{m_1 + m_2}, \quad u_{2x} = \frac{(m_2 - m_1)v_{2x} + 2m_1 v_{1x}}{m_1 + m_2},$$

где v_{1x}, v_{2x} — проекции скоростей шаров до столкновения; u_{1x}, u_{2x} — проекции после столкновения.

Если массы шаров одинаковые, т.е. $m_1 = m_2$, шары «обмениваются» скоростями:

$$u_{1x} = v_{2x},\ u_{2x} = v_{1x}.$$

1.1.4.13. Описание упругого центрального столкновения двух шаров массами m_1, m_2 в системе отсчета, где ЦМ покоится:

$$u'_{1x} = -u_{1x}, u'_{2x} = -u_{2x},$$

где u_{1x}, u_{2x} — проекции скоростей до удара; u'_{1x}, u'_{2x} — проекции скоростей после удара.

В этой системе отсчета проекции скоростей частиц после удара изменяют знак, не изменяясь по модулю.

1.1.4.14. Потенциальная энергия $E_{\text{упр}}$ упруго деформированного тела:

$$E_{\text{упр}} = \frac{kx^2}{2},$$

где k — жесткость; x — величина деформации.

Чаще всего формула используется в задачах с пружинами, резиновыми шнурами и т.д.

1.1.4.15. Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$ тела, поднятого над Землей на высоту h:

$$E_{\text{п}} = mgh = A.$$

Эта энергия равна работе A, совершаемой силой тяжести при падении тела с высоты h.

1.1.4.16. Сохранение полной механической энергии при падении тела с высоты h с начальной скоростью $v_{\text{вверху}}$:

$$E_{\text{к.внизу}} = E_{\text{полн.вверху}}, \quad \frac{mv^2_{\text{внизу}}}{2} = \frac{mv^2_{\text{вверху}}}{2} + mgh.$$

1.1.4.17. Подвешенный на нитке длиной l шарик, когда проходит положение равновесия после отклонения на угол α, имеет скорость

$$\upsilon = \sqrt{2gl(1-\cos\alpha)}.$$

1.1.4.18. Гравитационная потенциальная энергия взаимодействия двух точечных или сферически симметричных тел:

$$E_{\text{г}} = -\frac{GmM}{R},$$

где R — расстояние между центрами.

За нулевой уровень энергии принята энергия, соответствующая бесконечно большому расстоянию между телами.

1.1.4.19. *Закон сохранения энергии*. Изменение механической энергии $\Delta E_{\text{мех}}$ системы происходит из-за работы сил трения между телами, входящими в систему $A_{\text{тр.вн}}$, и работы внешних сил (любых, не только трения) $A_{\text{внш}}$:

$$\Delta E_{\text{мех}} = A_{\text{тр.вн}} + A_{\text{внш}}.$$

1.1.4.20. КПД $\eta_{\text{пл}}$ наклонной плоскости равен

$$\eta_{\text{пл}} \equiv \frac{\Delta E_{\text{пот}}}{A_{\text{под}}} \cdot 100\%,$$

где $\Delta E_{\text{пот}}$ — прирост потенциальной энергии при подъеме тела по наклонной плоскости; $A_{\text{под}}$ — затраченная на подъем работа.

1.1.5. Механические колебания и волны

1.1.5.1. *Второй закон Ньютона для пружинного маятника*:

$$ma = -kx \Rightarrow x'' + \frac{k}{m}x = 0, \quad x'' + \omega^2 x = 0, \quad \omega^2 = \frac{k}{m}.$$

Уравнение описывает гармонические колебания координаты — изменение со временем координаты тела при гармонических колебаниях

$$x(t) = x_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = x_m \cdot \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) = x_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right),$$

где x_m — амплитуда колебаний; ν — частота колебаний; $T = \dfrac{1}{\nu}$ — период колебаний, т.е. наименьший промежуток времени, через который состояние повторяется; $\omega = 2\pi\nu$ — циклическая частота; φ_0 — начальная фаза колебаний.

1.1.5.2. Соотношения между периодом колебаний T, частотой ν, циклической (угловой) частотой ω, числом колебаний N за время τ:

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\tau}{N}.$$

1.1.5.3. Изменение во времени скорости тела $v(t)$ при гармонических колебаниях с циклической частотой ω:

$$v(t) = x(t)' = \omega \cdot x_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = v_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad v_m = \omega \cdot x_m,$$

где x_m — амплитуда координаты; v_m — амплитуда колебаний скорости; φ_0 — начальная фаза колебаний.

1.1.5.4. Изменение со временем ускорения тела $a(t)$ при гармонических колебаниях с циклической частотой ω:

$$a(t) = v'(t) = x''(t) = -\omega^2 x_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -a_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$
$$a_m = \omega^2 x_m = \omega v_m,$$

где x_m — амплитуда координаты; v_m — амплитуда скорости; a_m — амплитуда колебаний ускорения; φ_0 — начальная фаза колебаний.

1.1.5.5. *Формула Гюйгенса*. Период T малых колебаний математического маятника длиной l равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

где ν, ω — соответственно частота и циклическая частота маятника.

1.1.5.6. Частота ν, циклическая частота ω, период T гармонических колебаний груза массы m на пружине жесткости k (пружинный маятник):

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega = 2\pi\nu = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

С такой частотой изменяются координата, скорость, ускорение груза. Кинетическая и потенциальная энергии изменяются с частотой, вдвое большей, — 2ν.

1.1.5.7. Полная энергия пружинного маятника (E):

$$E = \frac{mv(t)^2}{2} + \frac{kx(t)^2}{2} = m\left[\frac{v(t)^2}{2} + \frac{\omega^2 x(t)^2}{2}\right] = \text{const}$$

— сумма кинетической энергии и потенциальной упругой энергии. Координата $x(t)$ и скорость $v(t)$ изменяются со временем по гармоническим законам, полная энергия не изменяется (не зависит от времени).

Второе выражение для полной энергии (с частотой ω) применимо и для малых колебаний математического маятника. Максимальная кинетическая энергия равна максимальной потенциальной энергии:

$$\frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}.$$

1.1.5.8. Плоская волна амплитуды y_m с периодом колебаний T и длиной волны λ движется в положительном направлении оси x. Отклонение от положения равновесия $y(t, x)$ в точке с координатой x в момент времени t описывается уравнением бегущей волны:

$$y(t, x) = y_m \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = y_m \cos\varphi(t, x).$$

Фазы колебаний в волне $\varphi(t, x)$ в точках, отстоящих на расстояние λ друг от друга в один и тот же момент, отличаются на 2π:

$$\varphi(t, x) = \frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

1.1.5.9. Соотношение между частотой ν колебаний в волне, длиной волны λ и скоростью волны c:

$$\lambda\nu = c.$$

Применимо для звуковых и электромагнитных волн.

1.1.5.10. «Набег» фазы:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda}.$$

При распространении волны фаза колебаний в один и тот же момент времени в точках, отстоящих на расстояние Δx друг от друга, отличается на $\Delta\varphi$.

1.1.5.11. Суммарное колебание давления $p(t, x)$ при возбуждении двух когерентных звуковых волн частоты ω одинаковой амплитуды p_0 с разностью хода $\Delta s = s_2 - s_1$:

$$p(t, x) = 2p_0 \cos\left(\pi\frac{s_2 - s_1}{\lambda}\right)\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x - \delta\right).$$

1.1.5.12. Условие на разность хода Δs двух когерентных волн для наблюдения минимума на интерференционной картине:

$$\Delta s = \frac{\lambda(2m+1)}{2},\ m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots ,$$

где λ — длина волны в среде.

1.1.5.13. Условие на разность хода Δs двух когерентных волн для наблюдения максимума на интерференционной картине:

$$\Delta s = \lambda m,\ m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots ,$$

где λ — длина волны в среде.

1.1.5.14. *Доплеровский сдвиг частоты*. Скорости $v_{\text{пр}}$, $v_{\text{ис}}$ приемника и источника меньше скорости звука c:

1) неподвижный источник частоты ν. Приближающийся со скоростью $v_{\text{пр}}$ приемник воспринимает частоту

$$\nu_p = \nu \cdot \left(1 + \frac{v_{\text{пр}}}{c}\right);$$

2) движущийся к неподвижному приемнику источник. Приемник ловит частоту

$$\nu_i = \frac{\nu}{1 - \frac{v_{\text{ис}}}{c}}.$$

1.2. Задачи

1.2.1. Кинематика

1. В дорожной полиции раздался звонок: «Авария в двух километрах...». Тут связь прервалась. Какую важную информацию не успел передать звонивший? Что он не указал с точки зрения кинематики?

2. Поезд, не изменяя скорости, проезжал вечером мимо полустанка. Мальчик, лежаший в вагоне на верхней полке, нечаянно уронил телефон. Какую траекторию телефона увидел мальчик? Вагон был освещен, и падение телефона можно было наблюдать с платформы. Как выглядела траектория падавшего телефона для наблюдателя на платформе?

3. Мы говорим «Солнце всходит и заходит», т.е. рассуждаем о движении Солнца. Какое тело при таком разговоре подразумевается как тело отсчета?