Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Часть 1

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к решению задач
для студентов первого курса очной формы обучения

Омск 2014

УДК 530.1(075.8)
ББК 22.3
Г32

Практикум по физике. Часть 1. **Механика. Молекулярная физика и термодинамика**: Методические указания к решению задач / С. А. Гельвер, И. И. Гончар, И. А. Дроздова, С. Н. Крохин, Л. А. Литневский, С. А. Минабудинова, Н. А. Хмырова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 43 с.

Методические указания составлены в соответствии с действующей программой по курсу общей физики для втузов, содержат список основных формул и большой набор задач различного уровня сложности на основные уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения тел, на законы сохранения импульса, момента импульса и энергии, на газовые законы, законы термодинамики, различные тепловые процессы. В приложении приведены необходимые справочные данные для решения задач.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов первого курса.

Библиогр.: 5 назв. Табл. 4. Рис. 4. Прил. 1.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. А. Нехаев;
канд. физ.-мат. наук, доцент В. Н. Сергеев.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к решению задач по курсу общей физики помогут студентам изучить этот интереснейший предмет. Программа курса построена таким образом, чтобы студенты не только приобрели определенные знания, но и научились применять их на практике. Решение задач для реализации этой цели является совершенно необходимым.

Как научиться решать задачи?

Перед решением задач сначала нужно изучить теоретический материал по соответствующей теме, затем внимательно прочитать условие задачи и понять, к какому разделу физики относится рассматриваемая задача, какое явление и какой процесс она описывает. После этого следует переписать в тетрадь условие задачи полностью и кратко (столбиком), правильно обозначить используемые величины и рационально расставить индексы (это рекомендуется сделать после того, как выполнен рисунок). Значения величин, приведенные в задаче, следует перевести в «основные» единицы СИ (например, граммы – в килограммы, километры – в метры и т. д.).

Для решения задачи по механике необходимо выполнить рисунок и удачно выбрать систему отсчета (векторы на рисунке следует изображать длинными стрелками), построить проекции векторов на выбранные оси координат и выписать подходящие формулы. Иногда для наглядности полезно подчеркнуть известные и неизвестные величины, при необходимости найти дополнительные уравнения, если неизвестных больше, чем уравнений. Решать задачи следует только в общем виде. Численные значения величин рекомендуется подставлять в расчетную формулу после того, как получено алгебраическое выражение для искомой величины. Для выполнения расчетов необходимо научиться эффективно использовать микрокалькулятор, освоить операции со скобками, ячейками памяти и т. д.

Иногда бывает полезно систематизировать проведенные математические преобразования, проанализировать их, попробовать найти более рациональное решение после получения ответа в трудной задаче, еще раз вернуться к ее решению. *Repetitio est mater studiorum* (*лат.*) – гласит пословица, что означает: повторение – мать учения.

В задачах для самостоятельного решения цифра, стоящая в скобках после номера задачи, обозначает степень трудности задачи.

1. МЕХАНИКА

1.1. Векторы, производные и интегралы

Физические величины можно разделить на два типа: *скалярные* и *векторные*. Скалярные величины (масса, длина, работа, электрический заряд и др.) полностью характеризуются одним числовым значением. Векторные величины (перемещение, скорость, сила, импульс, момент силы и др.) характеризуются тремя числами (*проекциями вектора на ось*) или *числовым значением* (*модулем*) и *направлением* в пространстве (*ортом*). Геометрический образ вектора – это направленный отрезок прямой.

Над векторами можно выполнить *пять* алгебраических действий: *сложение, вычитание, умножение вектора на число, скалярное произведение, векторное произведение* (обратите внимание на отличие этих действий от четырех арифметических действий).

В курсе механики решаются не только задачи с равномерным и равноускоренным движением тел (как в курсе средней школы), но и задачи с произвольной зависимостью ускорения тела от времени, решение которых основано на вычислении производных и интегралов функций.

Задачи

1.(1) Выбрать правильные и ошибочные записи: 1) $\vec{a}=\vec{b}+\vec{c}$; 2) $a+b=c$; 3) $\vec{c}=2$; 4) $\vec{2}+\vec{3}=\vec{5}$; 5) $\vec{a}=3\vec{e}_x$; 6) $\vec{c}=-2{,}4\vec{e}_z$; 7) $\vec{c}=a\vec{b}$; 8) $\vec{c}=\vec{a}\vec{b}$; 9) $c=\vec{a}\vec{b}$; 10) $\vec{c}=\vec{a}\times\vec{b}$; 11) $\vec{a}=x\vec{e}_x+y\vec{e}_y$; 12) $\vec{r}=x\vec{e}_x-y\vec{e}_y$; 13) $\vec{\upsilon}=5$ м/с; 14) $\upsilon=-5$ м/с; 15) $\vec{a}\cdot\vec{b}=-3$.

2.(1) Путешественник движется со скоростью 1,6 м/с на северо-восток, ориентируясь по компасу. Угол между направлением его скорости и направлением на восток равен 30°. Найти проекции скорости движения туриста на координатные оси, направленные с запада на восток и с юга на север.

3.(1) Скорость камня, брошенного горизонтально, через несколько секунд стала равной 18 м/с и составила угол 30° к горизонту. Найти проекции скорости на горизонтальную (по начальной скорости) и вертикальную (вверх) оси.

4.(2) На лыжника, спускающегося с горы, наклон которой к горизонту составляет 30°, действуют три силы: сила тяжести, направленная *вертикально* вниз; сила реакции опоры, направленная *перпендикулярно поверхности горы* вверх; сила трения, направленная против направления движения лыжника. Найти проекции этих векторов на ось *Ox*, направленную *вдоль наклонной плоскости* вниз, и на ось *Oy*, направленную *перпендикулярно поверхности горы* вверх.

5.(1) Гуляя по Москве, турист прошел 0,43 км по Тверской, а затем, свернув под прямым углом на Театральный проезд, прошел еще 0,32 км. Чему оказалось равным перемещение туриста?

6.(1) Два корабля движутся расходящимися под углом 30° курсами со скоростью 18 и 24 км/ч. Найти относительную скорость кораблей.

7.(2) Найти равнодействующую сил, названных в задаче 4.

8.(1) Найти работу силы в 30 Н, действующей на небольшое тело под углом 30° к горизонту, при перемещении тела на 0,35 м по горизонтали.

9.(1 – 3) Для функций *f(x)* найти производную, интеграл и вычислить значение определенного интеграла на интервале от 0 до 1:

а) $f(x) = x^2 + 3$; б) $f(x) = 2x^3$; в) $f(x) = \sin 2x$;

г) $f(x) = \cos 3x$; д) $f(x) = \ln(2x + b)$; е) $f(x) = \sqrt{1 - \sin 2x}$.

10.(2, 3) Найти частные производные функций нескольких переменных по каждому аргументу функции:

а) $u(x, y) = x + y - 4xy^2$; б) $u(x, y) = \ln\ xy$; в) $u(x, y) = x\sin(x + y)$;

г) $u(x, y, z) = \ln\ x^2y^3/\sqrt{z}$; д) $u(x, y) = x/\sqrt{y^3}$; е) $u(x, y) = \ln(x + y^2)$.

1.2. Поступательное движение абсолютно твердого тела (АТТ)

1.2.1. Кинематика частицы и поступательного движения АТТ

Положение частиц относительно выбранной системы координат принято характеризовать радиус-вектором $\vec{r}(t)$, зависящим от времени. Тогда положение тела частицы в пространстве в любой момент времени можно найти по формуле:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \vec{s}. \tag{1}$$

Среди различных видов движения самым простым является *равномерное движение* – движение с постоянной скоростью (с нулевым ускорением). Очевидно, что такое движение может быть только прямолинейным. Именно при *равномерном движении* перемещение вычисляется по формуле:

$$\vec{s} = \vec{\upsilon} t. \qquad (2)$$

Иногда тело движется по криволинейной траектории так, что модуль скорости остается постоянным ($\upsilon = \text{const}$). В этом случае *пройденный путь* может быть вычислен по формуле:

$$l = \upsilon t. \qquad (3)$$

Равноускоренное движение – движение с постоянным ускорением ($\vec{a} = \text{const}$). Для такого движения справедливы формулы кинематики:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}t; \quad (4) \qquad \vec{s} = \vec{\upsilon}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}; \quad (5)$$

$$\upsilon^2 - \upsilon_0^2 = 2\vec{a}\vec{s}; \quad (6) \qquad \vec{s} = \frac{\vec{\upsilon} + \vec{\upsilon}_0}{2} t. \quad (7)$$

При *движении частицы по окружности с постоянной по модулю скоростью* она движется с так называемым *нормальным* (*центростремительным*) ускорением

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R}, \qquad (8)$$

направленным к центру окружности и перпендикулярным скорости движения.

В общем случае движения по криволинейной траектории ускорение частицы можно представить в виде суммы тангенциального (касательного) $\vec{a}_\tau$ и нормального (центростремительного) $\vec{a}_n$ ускорения:

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n = \frac{d\upsilon}{dt}\vec{e}_\upsilon + \frac{\upsilon^2}{R}\vec{e}_n, \qquad (9)$$

где $\vec{e}_\upsilon$, $\vec{e}_n$ – орт вектора скорости и орт нормали к траектории;

R – радиус кривизны траектории.

Движение тел всегда описывается относительно какой-либо системы отсчета (СО). При решении задач необходимо выбрать наиболее удобную СО. Для поступательно движущихся СО закон сложения скоростей в классической механике

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}' + \vec{u} \qquad (10)$$

позволяет легко переходить от одной СО к другой. В формуле (10) $\vec{v}$ – скорость тела относительно одной СО; $\vec{v}'$ – скорость тела относительно второй СО; $\vec{u}$ – скорость второй СО относительно первой.

В общем случае, рассматривая формулу определения ускорения

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} \tag{11}$$

как дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, скорость частицы можно найти после интегрирования:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \vec{a}(t)dt. \tag{12}$$

Аналогично, рассматривая формулу определения скорости в общем случае

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} \tag{13}$$

как дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, положение частицы в пространстве можно найти после интегрирования:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \vec{v}(t)dt. \tag{14}$$

Путь, пройденный частицей за промежуток времени ($\Delta t = t - t_0$), можно вычислить как интеграл от модуля вектора скорости:

$$l = \int_{t_0}^{t} v(t)dt. \tag{15}$$

Радиус-вектор, как и любой другой вектор, можно выразить через проекции и орты выбранной системы координат. Формула

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{e}_x + y(t)\vec{e}_y + z(t)\vec{e}_z \tag{16}$$

представляет собой радиус-вектор в декартовой системе координат.

Система функций

$$\begin{cases} x = x(t); \\ y = y(t); \\ z = z(t) \end{cases} \tag{17}$$

является *уравнением траектории в параметрической форме*. При движении в плоскости, например *xOy*, можно получить уравнение траектории в явном виде: $y = y(x)$, если из первых двух функций системы (17) исключить время.

Задачи

11.(1) С каким ускорением движется поезд, если на пути 1200 м его скорость возросла от 10 м/с до 20? Сколько времени затратил поезд на этот путь?

12.(1) Тело, брошенное вертикально вверх, вернулось на землю через 3,2 с. Найти начальную скорость тела и наибольшую высоту подъема. Сопротивлением воздуха пренебречь.

13.(2) Тело поднимают на веревке с поверхности земли с ускорением 2,7 м/с^2 вертикально вверх из состояния покоя. Через 5,8 с веревка оборвалась. Сколько времени двигалось тело до земли после того, как оборвалась веревка? Сопротивлением воздуха пренебречь.

14.(1) Баскетболист бросает мяч в кольцо со скоростью 8,5 м/с под углом 63° к горизонту. С какой скоростью мяч попал в кольцо, если долетел до него за 0,93 с? Сопротивлением воздуха пренебречь.

15.(2) Мяч брошен горизонтально со скоростью 13 м/с, спустя некоторое время его скорость оказалась равной 18 м/с. Найти перемещение мяча за это время. Сопротивлением воздуха пренебречь.

16.(2) При открывании двери ручка из состояния покоя движется вместе с дверью по окружности радиусом 68 см с постоянным тангенциальным ускорением, равным 0,32 м/с^2. Найти зависимость полного ускорения ручки от времени.

17.(2) Грузило, движущееся на леске по окружности с постоянным тангенциальным ускорением, к концу четвертого оборота имело скорость 11 м/с, а после 4,0 с движения его нормальное ускорение стало 92 м/с^2. Найти радиус этой окружности.

18.(2) Два корабля движутся относительно берегов со скоростью 9,0 и 12,0 узлов (1 узел = 0,514 м/с), направленной под углом 30 и 60° к меридиану соответственно. Найти скорость второго корабля относительно первого.

19.(2) Реактивный снаряд движется в плоскости *xOy* так, что его координаты меняются с течением времени по закону: $x(t) = (2,3t^2 - 4,5)$ м; $y(t) = (3,7t - 1,6)$ м. Найти в момент времени, равный 86 с, векторы скорости и ускорения и их модули. Получить уравнение траектории и построить ее. Определить перемещение снаряда за первые 12 с движения.

20.(3) Частица движется с зависящей от времени скоростью $\vec{\upsilon}(t) = At^2\vec{i} + Bt\vec{j}$, где A = 1,2 м/с^3; B = 7,1 м/с^2. Найти в момент времени, равный 2,7 с, модули ускорения, скорости и радиуса-вектора, а также путь и перемещение частицы за промежуток времени от t_1 = 1,4 с до t_2 = 3,8 с. В начальный момент времени частица находилась в начале координат.

1.2.2. Динамика частицы и поступательного движения АТТ

Порядок решения всех динамических задач принципиально прост: необходимо обозначить неизвестные величины, составить основные уравнения динамики движения:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i \quad (18) \qquad \text{или} \qquad m\vec{a} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i, \quad (19)$$

пользуясь вторым и третьим законами Ньютона, а также принципами независимости и суперпозиции сил, и учесть при этом условия, налагаемые на траекторию движения. Таким путем всегда можно получить дифференциальные уравнения для определения неизвестных величин.

В формуле (18) $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$ − *импульс частицы* массой m, движущейся со скоростью $\vec{\upsilon}$.

В задачах необходимо выбирать инерциальную систему отсчета (ИСО), а координатные оси в ней располагать так, чтобы задача решалась наиболее простым и удобным способом.

При описании движения связанных тел следует записать уравнения движения для каждого тела, а взаимодействие между телами учесть с помощью сил реакции, сил натяжения нитей и т. д. Тогда формально тела можно рассматривать как независимые. Как правило, сначала необходимо вывести формулу для ускорения тел, а затем следует применить формулы кинематики.

Задачи

21.(2) Локомотив массой 100 т на прямом горизонтальном участке пути длиной 600 м увеличил скорость от 10 м/с до 20. Найти силу тяги двигателя локомотива, если коэффициент сопротивления движению равен 0,12.

22.(2) Какой наименьший путь потребуется автомобилю для остановки, если автомобиль движется со скоростью 108 км/ч, а коэффициент трения скольжения шин по асфальтобетону 0,63?

23.(2) Автомобиль массой 1,95 т поднимается в гору с углом наклона, равным 35^{o}. На участке пути длиной 32 м скорость автомобиля увеличилась от 25 км/ч до 38. Считая движение равноускоренным, определить силу тяги двигателя. Коэффициент сопротивления движению принять равным 0,23.

24.(2) Коэффициент трения ботинок о камень равен 0,68. С каким наибольшим ускорением человек сможет подниматься на гору, наклон которой к горизонту 30°? С каким ускорением в таких ботинках человек будет скользить вниз с горы, наклон которой 40°? На склоне какой наибольшей крутизны еще можно удержаться в этих ботинках?

25.(2) Какую скорость должен иметь искусственный спутник, чтобы лететь по круговой орбите, расположенной в плоскости экватора на высоте 1600 км над Землей?

26.(2) Насколько вес человека массой 70 кг, стоящего на пружинных весах на экваторе, меньше силы тяжести?

27.(2) Через легкий неподвижный блок перекинут шнур. К одному концу шнура привязан груз массой 1,6 кг, к другому – 4,2 кг. Чему будут равны сила натяжения шнура и сила давления на ось блока во время движения грузов? Массой блока и шнура и трением шнура о блок пренебречь.

28.(2) На столе лежит брусок массой 5,3 кг. К бруску привязан шнур, перекинутый через неподвижный невесомый блок. К другому концу шнура привязана гиря массой 2,4 кг. С каким ускорением будут двигаться брусок и гиря, если коэффициент трения бруска о поверхность стола равен 0,25?

29.(3) Парашютист массой 85 кг падает при открытом парашюте с установившейся скоростью, равной 5,3 м/с. Какой будет установившаяся скорость, если на том же парашюте будет спускаться груз массой 38 кг? Сила сопротивления воздуха пропорциональна квадрату скорости парашютиста.

30.(3) Катер массой 525 кг движется по озеру со скоростью 15 м/с. В момент времени, равный нулю, выключили двигатель. Считая силу сопротивления движению катера пропорциональной скорости катера $\vec{F} = -\mu\vec{v}$, где μ = 330 кг/с – коэффициент сопротивления, найти путь, пройденный катером до остановки.

1.3. Вращение АТТ вокруг неподвижной оси

1.3.1. Кинематика вращения АТТ вокруг неподвижной оси

Основными кинематическими характеристиками вращательного движения твердого тела являются угловое перемещение (угол поворота) φ, угловая скорость $\vec{\omega}$ и угловое ускорение $\vec{\varepsilon}$.

Угол поворота φ является скалярной величиной, в СИ измеряется в радианах.

Угол поворота φ связан с числом оборотов N соотношением:

$$\varphi = 2\pi N. \tag{20}$$

Угловая скорость характеризует быстроту вращательного движения и при вращении АТТ вокруг неподвижной оси определяется через производную от угла поворота тела по времени:

$$\omega_z = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{21}$$

Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения тела в ту сторону, откуда видно вращение, происходящее против хода часовой стрелки.

По известному закону изменения со временем угловой скорости $\omega = \omega_z(t)$ можно найти закон изменения угла поворота:

$$\varphi(t) = \int_{t_0}^{t} \omega_z(t)dt. \tag{22}$$

Изменение угловой скорости со временем характеризуется угловым ускорением. По аналогии с угловой скоростью угловое ускорение тела также можно представить в виде вектора $\vec{\varepsilon}$, направленного вдоль оси вращения тела. Направление вектора $\vec{\varepsilon}$, совпадает с направлением вектора $\vec{\omega}$, когда вращение ускоренное, и противоположно направлению вектора $\vec{\omega}$ при торможении. Угловое ускорение в данный момент времени определяется через первую производную от угловой скорости или вторую производную от угла поворота тела по времени:

$$\varepsilon_z = \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \tag{23}$$

Аналогично определению закона изменения угла поворота можно найти закон изменения со временем угловой скорости:

$$\omega_z(t) = \omega_z(t_0) + \int_{t_0}^{t} \varepsilon_z(t)dt. \tag{24}$$

В случае вращения тела с $\vec{\varepsilon} = \text{const}$ из формул (21) и (23) получаются соотношения:

$$\omega_z = \omega_{0z} + \varepsilon_z t; \quad (25) \qquad \varphi = \omega_{0z} t + \frac{\varepsilon_z t^2}{2}; \quad (26)$$

$$\varphi = \frac{\omega_z^2 - \omega_{0z}^2}{2\varepsilon_z}; \quad (27) \qquad \varphi = \frac{\omega_{0z} + \omega_z}{2} t. \quad (28)$$

Модули линейной скорости, нормального и тангенциального ускорения связаны с кинематическими характеристиками вращательного движения соотношениями:

$$\upsilon = \omega R; \quad (29) \qquad a_n = \omega^2 R; \quad (30) \qquad a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt} = \varepsilon_z R. \quad (31)$$

Задачи

31.(1) Тело, вращаясь равнопеременно, за время 2,3 с изменило угловую скорость от 2,1 рад/с до 0,98. Найти угловое ускорение тела.

32.(1) Твердое тело вращается равнопеременно вокруг неподвижной оси. Скорость точки, находящейся на расстоянии 10 см от оси, в начальный момент времени равна 0,95 м/с, а через 5,8 с – 4,0 м/с. Определить через 4,3 с после начала движения: 1) угловую скорость и угловое ускорение тела; 2) линейную скорость, тангенциальное, нормальное и полное ускорение указанной точки.

33.(1) Тело, вращаясь равнопеременно, за 5,0 с от начала движения совершило 100 оборотов. Найти угловое ускорение тела.

34.(1) Маховик, вращающийся с частотой 1,8 $с^{-1}$, останавливается через 1,5 мин. Считая движение равнопеременным, найти, сколько оборотов сделал маховик до остановки, и его угловое ускорение.

35.(1) Тело вращается вокруг неподвижной оси. Зависимость угловой скорости от времени приведена на рис. 1. Чему равно угловое ускорение тела?

36.(2) Колесо машины за 120 с изменило частоту вращения от 240 об/мин до 60. Найти угловое ускорение колеса и число оборотов, сделанных колесом за это время.

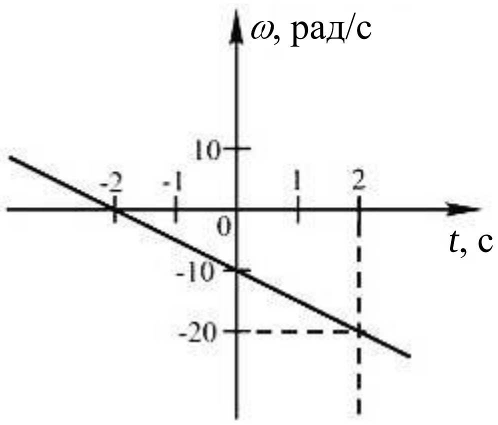

Рис. 1. Зависимость угловой скорости от времени

37.(2) Колесо радиусом 110 мм вращается вокруг оси Oz, перпендикулярной плоскости колеса и проходящей через его центр масс так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени задается уравнением: $\varphi(t) = A + Bt + Ct^3$, где $B = 2{,}5$ рад/с; $C = 1{,}8$ рад/с^3. Найти через 1,8 с после начала движения угловую скорость и угловое ускорение колеса. Для точек, лежащих на ободе колеса, найти в указанный момент времени: 1) линейную скорость, 2) тангенциальное, нормальное и полное ускорение.

38.(2) Найти нормальное и тангенциальное ускорение точки лопатки турбины, расположенной на расстоянии 1,3 м от оси вращения, через 15 с после пуска турбины, если зависимость модуля линейной скорости лопатки от времени выражена уравнением: $\upsilon(t) = At + Bt^2$, где $A = 2{,}2$ м/с^2, $B = 0{,}83$ м/с^3.

39.(2) Диск радиусом 2,2 м вращается вокруг оси Oz, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр масс, так, что угловая скорость диска меняется со временем по закону: $\omega_z(t) = A + Bt^2$, где $A = 2{,}4$ рад/с; $B = 3{,}9$ рад/с^3. Вычислить тангенциальное ускорение точек диска, находящихся от его центра на расстоянии, равном половине радиуса диска, в момент времени 3,1 с. Определить угол, на который повернется диск за это время.

40.(2) Зависимость угловой скорости диска, вращающегося вокруг оси Oz, перпендикулярной его плоскости и проходящей через центр масс диска, от времени задается законом: $\omega_z(t) = At^2 + Bt^3$. Вычислить полное ускорение точек, лежащих на краю диска, в момент времени 0,98 с. Определить зависимость угла поворота диска от времени. Радиус диска равен 40 см; $A = 2{,}5$ рад/с^3; $B = 2{,}1$ рад/с^4.

1.3.2. Момент силы. Момент инерции и момент импульса АТТ

Момент силы – величина, характеризующая вращательный эффект силы. При вращении АТТ вокруг неподвижной оси Oz проекция *момента силы отно-*

сительно любой точки O, лежащей на этой оси, который определяется векторным произведением радиуса-вектора $\vec{r}$, проведенного из точки O в точку приложения силы, на вектор силы $\vec{F}$

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F} \qquad (32)$$

совпадает с моментом силы M_z относительно этой оси.

Если угловая скорость направлена по оси Oz и проекция момента силы на ось вращения положительна, то такой момент силы называют вращающим, иначе – тормозящим.

Момент инерции – величина, характеризующая распределение массы в теле и являющаяся мерой инертности тела при вращательном движении.

Моментом инерции тела относительно неподвижной оси Oz называется скалярная величина

$$I_z = \sum_i^N m_i r_i^2, \qquad (33)$$

где m_i – масса i-й частицы тела;

r_i – расстояние от i-й частицы тела до оси вращения Oz;

N – число частиц, из которых состоит тело.

Индекс z у момента инерции обозначает, что момент инерции определяется относительно оси Oz.

В случае непрерывного распределения массы тела сумма, стоящая в формуле (33), заменяется интегралом:

$$I_z = \int_V r^2 dm. \qquad (34)$$

Определение интеграла (34) в общем случае представляет собой сложную задачу. Однако ситуация упрощается, когда нужно вычислить моменты инерции однородных симметричных тел относительно осей, проходящих через центры масс тел и являющихся осями симметрии.

Центр инерции (*центр масс*) АТТ (системы частиц) – это такая точка, координаты которой определяются из соотношений:

$$x_C = \frac{\sum m_i x_i}{m}; \quad (35) \qquad y_C = \frac{\sum m_i y_i}{m}; \quad (36) \qquad z_C = \frac{\sum m_i z_i}{m}. \quad (37)$$

Скорость центра инерции (*центра масс*) АТТ (системы частиц) можно рассчитать по формуле:

$$\vec{\upsilon}_C = \frac{\sum m_i \vec{\upsilon}_i}{m}. \tag{38}$$

Результаты вычисления моментов инерции ряда тел правильной геометрической формы относительно оси Oz, проведенной через центр масс твердого тела, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Моменты инерции некоторых тел правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через их центр масс

Обруч (полый цилиндр)	Диск (сплошной цилиндр)	Шар	Стержень
$I_C = mR^2$	$I_C = \frac{1}{2}mR^2$	$I_C = \frac{2}{5}mR^2$	$I_C = \frac{1}{12}m\ell^2$

Если ось Oz не проходит через центр масс, то момент инерции I_z определяется по *теореме Гюйгенса – Штейнера*:

$$I_z = I_C + md^2, \tag{39}$$

где I_z – момент инерции относительно оси вращения Oz;

I_C – момент инерции относительно оси симметрии, параллельной оси Oz и проходящей через центр масс;

d – расстояние между осями;

m – масса тела.

Момент импульса $\vec{L}$ (момент количества движения, кинетический момент) твердого тела – характеристика вращательного движения.

Момент импульса абсолютно твердого тела $\vec{L}_O$ *относительно неподвижного центра O* равен геометрической сумме моментов импульсов всех точек тела относительно того же центра:

$$\vec{L}_O = \sum_i \vec{r}_i \times m_i \vec{\upsilon}_i. \tag{40}$$

Если абсолютно твердое тело вращается вокруг неподвижной оси Oz, то

$$L_z = I_z \omega_z, \tag{41}$$

где L_z – проекция момента импульса на ось Oz;

I_z – момент инерции твердого тела относительно оси Oz.

Задачи

41.(1) В плоскости yOz на частицу, координаты которой $y = 4{,}1$ м, $z = 2{,}8$ м, действует сила 6,3 Н, направленная под прямым углом к радиусу-вектору частицы (рис. 2). Чему равен момент этой силы относительно точки O?

42.(1) По окружности радиусом 5,5 м (центр окружности – точка O) в плоскости yOz со скоростью 0,98 м/с движется частица массой 12 кг (рис. 3). Чему равен момент импульса этой частицы относительно точки O?

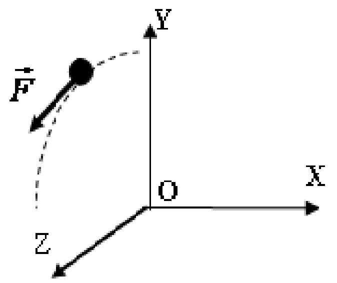

Рис. 2. Действие силы на частицу

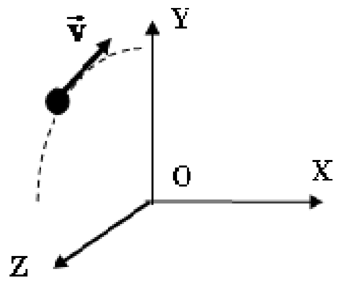

Рис. 3. Движение частицы по окружности

43.(2) Определить момент инерции тонкого кольца радиусом 20 см и массой 100 г относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через любую точку на кольце.

44.(2) Найти момент импульса Земли относительно собственной оси вращения.

45.(2) Механическая система состоит из двух частиц массой 0,12 г и 0,24 г соответственно. Первая частица находится в точке с координатами (3; 5; 0), вторая – в точке (6; 2; 0) (координаты даны в сантиметрах). Вычислить: 1) координаты центра масс; 2) скорость центра масс, если частицы начнут движение вдоль оси x навстречу друг другу каждая со скоростью 11 см/с относительно этой оси. Показать на чертеже положение центра масс и вектор скорости центра масс.

1.3.3. Основной закон динамики вращения АТТ вокруг неподвижной оси

Изменение момента импульса абсолютно твердого тела происходит только в результате действия момента внешних сил $\sum_i \vec{M}_O$. Уравнение моментов (теорема об изменении момента импульса) имеет вид:

$$\frac{d\vec{L}_O}{dt} = \sum_i \vec{M}_O. \qquad (42)$$

Формула (42) сохранит свой вид, если за неподвижный центр O принимается центр масс твердого тела.

Если ось вращения Oz проходит через центр масс твердого тела, то уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси примет вид:

$$\frac{dL_z}{dt} = \sum_i M_z \qquad (43)$$

или

$$\sum_i M_z = I_z \varepsilon. \qquad (44)$$

Соотношение (44) называется *основным уравнением динамики вращательного движения абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси.*

Задачи

46.(2) Вентилятор вращается с частотой 15 об/с. Под действием тормозящего момента, равного 1,2 Н·м, вентилятор останавливается за 40 с. Найти момент инерции вентилятора. Какую угловую скорость будет иметь вентилятор спустя 10 с от начала торможения? Сколько оборотов сделает вентилятор за это время?

47.(2) Маховое колесо, имеющее момент инерции 245 кг·м^2, вращается вокруг оси симметрии, перпендикулярной плоскости колеса, делая 20 об/с. После того, как на колесо перестал действовать вращающий момент сил, оно остановилось, сделав 1000 оборотов. Найти: 1) момент сил трения; 2) время, прошедшее от момента прекращения действия вращательного момента до полной остановки колеса.

48.(2) К ободу колеса, имеющего форму диска, радиусом 0,53 м и массой 4,8 кг приложена касательная сила 98 Н. Под действием этой силы колесо начинает вращаться вокруг оси симметрии, перпендикулярной плоскости колеса. Найти: 1) угловое ускорение колеса; 2) через сколько времени после начала действия силы колесо будет иметь скорость 100 об/с?

49.(2) Обруч радиусом 30 см и массой 1,4 кг вращается вокруг неподвижной оси, перпендикулярной обручу и проходящей через его произвольную точку. При этом угол поворота обруча с течением времени меняется по закону: $\varphi(t) = At + Bt^2$, где A = 2,2 рад/с; B = 3,3 рад/с^2. Найти: 1) момент силы, действующий на обруч; 2) число оборотов, которое обруч сделает за 20 с от начала вращения.

50.(3) Через блок в форме диска радиусом 10 см и массой 20 г перекинута невесомая нерастяжимая нить, к концам которой подвешены грузы одинаковой массы. Если к правому грузу добавить перегрузок, то блок начнет вращаться, так что правый груз опустится на 50 см за промежуток времени 1,53 с. Найти: 1) угловое ускорение блока; 2) угловую скорость через этот промежуток времени; 3) результирующий момент относительно оси вращения сил, действующих на блок.

1.4. Механическая работа. Энергия. Законы сохранения в механике

1.4.1. Механическая работа. Энергия. Закон сохранения энергии

В общем случае работа A, совершаемая силой $\vec{F}(\vec{r})$ по перемещению частицы из точки $B_1(x_1, y_1, z_1)$ в точку $B_2(x_2, y_2, z_2)$, определяется с помощью криволинейного интеграла

$$A = \int_{B_1}^{B_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_{B_1}^{B_2} (F_x dx + F_y dy + F_z dz), \qquad (45)$$

где $\vec{F} \cdot d\vec{r}$ – скалярное произведение векторов силы $\vec{F}$ и элементарного перемещения $d\vec{r}$.

Расчет мгновенной P и средней $\langle P \rangle$ мощности выполняется по формулам:

$$P = \frac{\delta A}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{\upsilon} = F_x \upsilon_x + F_y \upsilon_y + F_z \upsilon_z, \quad (46) \qquad\qquad \langle P \rangle = \frac{A}{t}, \quad (47)$$

где δA – элементарная работа, производимая силой за время dt;

A – полная работа силы за время t.

Если при прямолинейном перемещении частицы работа совершается силой $\vec{F}$, не зависящей от координат, то формула (45) упрощается и принимает вид:

$$A = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = \left|\vec{F}\right|\left|\Delta\vec{r}\right|\cos\alpha = F_x\Delta x + F_y\Delta y + F_z\Delta z, \tag{48}$$

где α – угол между векторами силы $\vec{F}$ и перемещения $\Delta\vec{r}$.

При вращении абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси Oz внешняя сила, создающая момент $\vec{M}$, совершает работу

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_\varphi d\varphi, \tag{49}$$

где M_φ – проекция вектора $\vec{M}$ на направление вектора угловой скорости;

$M_\varphi = \pm M_z$. Знак работы зависит от знака M_φ.

Если момент сил относительно оси M_z постоянен, а начало отсчета угла поворота совпадает с началом действия силы ($\varphi_0 = 0$), то

$$A = M_\varphi \varphi. \tag{50}$$

Потенциальная энергия частицы массой m, которая находится вблизи поверхности Земли на высоте h, измеренной от произвольно выбранного нулевого уровня, рассчитывается согласно уравнению

$$W_p = mgh. \tag{51}$$

При условии, что потенциальная энергия недеформированного ($x = 0$) тела принимается равной нулю, потенциальная энергия стержня или пружины при их малом растяжении или сжатии вычисляется по выражению:

$$W_p = \frac{kx^2}{2}, \tag{52}$$

где x – смещение точек деформированных тел от положения равновесия;

k – коэффициент упругости (жесткость) пружины или стержня.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух частиц массой m_1 и m_2, расстояние между которыми r, определяется по формуле:

$$W_p = -G\frac{m_1 m_2}{r}. \tag{53}$$

Напомним, что взаимосвязь консервативной силы с потенциальной энергией устанавливается выражением:

$$\vec{F} = -gradW_p \quad (54)$$

(сила равна градиенту потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком).

Многие задачи легко решить, воспользовавшись *теоремой об изменении кинетической энергии*: приращение кинетической энергии системы частиц (твердого тела) равно сумме работ всех внешних и внутренних сил и моментов этих сил, действующих на частицы системы (твердое тело):

$$A = \Delta W_k = W_{k2} - W_{k1}. \quad (55)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) механизма определяется отношением полезной работы ($A_{пол}$) и совершенной механизмом ($A_{сов}$):

$$\eta = \frac{A_{пол}}{A_{сов}} \cdot 100\ \%. \quad (56)$$

Кинетическая энергия частицы массой m, движущейся со скоростью $\vec{\upsilon}$, а также кинетическая энергия абсолютно твердого тела массой m, движущегося *поступательно* со скоростью $\vec{\upsilon}$, определяется по формуле:

$$W_k = \frac{m\upsilon^2}{2}. \quad (57)$$

Кинетическая энергия абсолютно твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси Oz с угловой скоростью $\vec{\omega}$, определяется по формуле:

$$W_k = \frac{I_z\omega^2}{2}, \quad (58)$$

где I_z – момент инерции тела относительно оси Oz.

Кинетическая энергия АТТ при его плоском движении может быть вычислена как сумма кинетической энергии поступательного и вращательного движений тела по формуле:

$$W_k = \frac{m{\upsilon_C}^2}{2} + \frac{I_C\,\omega^2}{2}, \quad (59)$$

где υ_C – скорость движения центра масс тела;

I_C – момент инерции тела относительно оси вращения, проходящей через центр масс.

Полная механическая энергия тела, движущегося во внешнем потенциальном поле сил, равна сумме его кинетической и потенциальной энергии:

$$W = W_k + W_p. \tag{60}$$

В отсутствие диссипативных сил к механической системе применим *закон сохранения механической энергии*: механическая энергия замкнутой консервативной системы тел остается постоянной, при взаимодействиях тел она может переходить из кинетической энергии в потенциальную и обратно.

В общем случае, в том числе при наличии диссипативных сил (например, сил трения), когда механическая энергия может переходить в другие виды энергии, в частности во внутреннюю, выполняется *общефизический закон сохранения энергии*: во всех процессах, происходящих в природе, энергия ниоткуда не возникает и никуда не исчезает, а лишь переходит из одной формы в другую.

Задачи

51.(1) Автомобиль массой 1,25 т движется вверх по наклонному участку дороги с постоянной скоростью 36 км/ч. Длина участка дороги равна 150 м, угол ее наклона к горизонтали составляет 15°. Коэффициент сопротивления равен 0,051. Найти работу равнодействующей всех сил, действующих на автомобиль, и работу каждой силы в отдельности, считая эти силы постоянными.

52.(2) Две частицы массой 2,7 кг каждая, находящиеся первоначально на расстоянии 14 см друг от друга, начинают движение навстречу друг другу вследствие гравитационного взаимодействия. Какова работа гравитационной силы за время, прошедшее от начала движения до момента, когда расстояние между частицами стало равным 2,0 см?

53.(2) Тело массой 5,0 кг бросили с земли вертикально вверх со скоростью 5,0 м/с. С какой скоростью тело упало на землю, если сила сопротивления воздуха на всем пути совершила работу, равную −25 Дж?

54.(3) Сила тяги локомотива линейно возрастает от 33 МН до 66 на пути длиной 1,2 км. Какова работа силы тяги за это время?

55.(3) К однородному покоящемуся шару массой 2,1 кг и радиусом 4,2 см в точке, наиболее удаленной от оси вращения, совпадающей с осью симметрии, приложили касательную силу 22 Н, перпендикулярную оси вращения. Найти работу этой силы за 11 с от начала вращения шара. Трением на оси пренебречь.

56.(2) Найти кинетическую энергию велосипеда (с велосипедистом), движущегося со скоростью 9,3 км/ч. Масса велосипеда вместе с велосипедистом равна 80 кг, причем на колеса приходится масса 3,0 кг. Колеса считать обручами. Скольжения нет.

57.(2) Определить работу силы тяжести при падении на поверхность Земли тела массой 3,7 кг с высоты, равной половине радиуса Земли.

58.(2) Камень бросили с Земли со скоростью 12 м/с вверх под углом к горизонту. Найти модуль скорости камня на высоте 4,5 м над Землей.

59.(2) Пружина жесткостью 530 Н/м была первоначально сжата силой 140 Н. Затем к пружине приложили дополнительную сжимающую силу. Определить работу дополнительной силы, если пружина под ее действием оказалась сжатой еще на 2,5 см.

60.(3) Шар и обруч одинаковой массы скатываются без скольжения с наклонной плоскости высотой 0,25 м. Во сколько раз будут отличаться друг от друга значения скоростей центров шара и обруча у основания наклонной плоскости?

1.4.2. Закон сохранения импульса. Столкновение частиц

Импульс (количество движения) – это векторная характеристика движения. *Импульс частицы* массой m, движущейся со скоростью $\vec{v}$, определяется по формуле:

$$\vec{p} = m\vec{v}, \tag{61}$$

импульс системы – по выражению:

$$\vec{p}_{\text{сист}} = \sum_i \vec{p}_i, \tag{62}$$

где $\vec{p}_i$ – импульс i-й частицы.

Если на систему частиц не действуют внешние силы (система является изолированной) или векторная сумма всех внешних сил, действующих на систему, равна нулю, то вектор импульса системы не изменяется (как по величине, так и по направлению):

$$\vec{p}_{\text{сист}} = \text{const}. \tag{63}$$

Это утверждение выражает *закон сохранения импульса.*

В случае, когда результирующая внешняя сила не равна нулю, но ее проекция на некоторую ось, например ось *Ox*, равна нулю, постоянной остается проекция импульса системы на эту ось:

$$p_{\text{сист}\,x} = \sum_i m_i \upsilon_{ix} = \text{const}. \tag{64}$$

Заметим, что импульсы всех рассматриваемых тел в формулах (62) и (64) должны вычисляться в одной и той же инерциальной системе отсчета.

К числу задач, решаемых в курсе механики и иллюстрирующих удобство применения законов сохранения, относятся задачи на столкновение двух тел.

Для любого столкновения выполняются общефизический закон сохранения энергии и закон сохранения импульса. Для абсолютно упругого удара применяется закон сохранения механической энергии. В случае неупругого удара закон сохранения механической энергии не выполняется, так как при неупругом ударе часть механической (кинетической) энергии системы расходуется на деформацию соударяющихся тел и в конечном счете переходит в тепловую (внутреннюю) энергию.

По определению при абсолютно неупругом ударе сразу после взаимодействия тела́ движутся как одно целое с общей скоростью.

Задачи

61.(1) Граната массой 0,61 кг, имевшая скорость 5,0 м/с, направленную вертикально вверх, разорвалась на два осколка. Первый осколок массой 200 г полетел вертикально вверх со скоростью 10 м/с. Найти модуль и направление вектора импульса второго осколка.

62.(1) На плот массой 120 кг, движущийся по реке со скоростью 5,0 м/с, с берега горизонтально (перпендикулярно направлению движения плота) бросают груз массой 80 кг со скоростью 10 м/с. Найти величину и направление скорости плота вместе с грузом после броска.

63.(2) Мальчик массой 60 кг, стоящий на коньках на поверхности льда, бросает в горизонтальном направлении мяч массой 0,8 кг со скоростью 5,0 м/с а) относительно земли; б) относительно мальчика. Найти модуль и направление вектора импульса, полученного мальчиком в момент броска.

64.(2) В лодке массой 247 кг стоит человек массой 66 кг. Лодка плывет со скоростью 2,3 м/с. Человек прыгает с лодки в горизонтальном направлении со скоростью 4,1 м/с (относительно лодки). Найти скорость лодки после прыжка человека: а) вперед по движению лодки; б) в сторону, противоположную движению лодки.

65.(3) Снаряд массой 22 кг, летящий горизонтально со скоростью 384 м/с, попадает в вагонетку с песком массой 1830 кг и застревает в песке. С какой скоростью стала двигаться вагонетка со снарядом, если до попадания снаряда вагонетка двигалась со скоростью 2,0 м/с по направлению движения снаряда? С какой скоростью стала бы двигаться вагонетка, если бы снаряд летел против движения вагонетки?

66.(2) Два соприкасающихся шара подвешены на параллельных вертикальных нитях одинаковой длины. Расстояния от точек подвеса нитей до центров шаров одинаковы. Масса первого шара равна 0,42 кг, второго – 250 г. Первую нить отклоняют так, что шар поднимается на высоту 4,5 см, и отпускают его. На какую высоту поднимутся шары после абсолютно неупругого соударения? Высота подъема шаров много меньше длины нитей.

67.(2) Два метеорита движутся по одной траектории. Один метеорит движется со скоростью 52 км/с относительно Солнца, другой догоняет его, двигаясь со скоростью 175 км/с относительно Солнца. Определить отношение масс метеоритов, если в результате соударения второй метеорит остановился. Удар считать центральным и абсолютно упругим.

68.(2) Пуля массой 9,0 г, летящая горизонтально со скоростью 150 м/с, попадает в лежащий на столе брусок массой 250 г и, потеряв половину своей кинетической энергии, вылетает из бруска. Какой импульс приобретает брусок? Какое количество тепла выделяется в бруске при взаимодействии его с пулей?

69.(2) Молотком, масса которого 800 г, забивают в стену гвоздь массой 12 г. Определить КПД молотка при данных условиях. Удар считать абсолютно неупругим. К какому соотношению масс молотка и гвоздя следует стремиться при забивании гвоздей?

70.(2) Паровой молот массой 12 т падает со скоростью 5,0 м/с на наковальню, масса которой вместе с отковываемым куском железа равна 250 т. Определить: 1) производимую механизмом работу по расплющиванию железа; 2) энергию, потерянную на сотрясение фундамента; 3) КПД механизма. Удар абсолютно неупругий.

1.4.3. Закон сохранения момента импульса

Момент импульса (кинетический момент, момент количества движения) $\vec{L}_{O_{\text{сист}}}$ системы абсолютно твердых тел относительно некоторого неподвижного центра (точки) O – характеристика вращательного движения, равен векторной сумме моментов импульсов тел:

$$\vec{L}_{O_{\text{сист}}} = \sum_i \vec{L}_{Oi}, \qquad (65)$$

где $\vec{L}_{Oi}$ – момент импульса i-го тела.

Если на систему абсолютно твердых тел не действуют моменты внешних сил или результирующий момент сил равен нулю, то момент импульса системы тел относительно точки O остается постоянным:

$$\vec{L}_{O_{\text{сист}}} = \text{const}, \qquad (66)$$

т. е. выполняется *закон сохранения момента импульса.*

Пусть абсолютно твердое тело вращается с угловой скоростью $\vec{\omega}$ вокруг неподвижной оси Oz, его момент инерции относительно этой оси – I_z . Тогда момент импульса тела относительно оси Oz (проекция вектора момента импульса $\vec{L}_O$ на ось Oz) определяется по формуле:

$$L_z = I_z \omega_z, \qquad (67)$$

где ω_z – проекция вектора угловой скорости тела на ось Oz.

Если результирующий момент внешних сил, действующих на систему тел, не равен нулю, но его проекция на некоторую ось (момент сил относительно оси) равна нулю, то постоянным остается момент импульса системы относительно этой оси. Например, если система тел вращается вокруг неподвижной оси Oz и результирующий момент внешних сил относительно этой оси равен нулю, то момент импульса системы относительно оси вращения не меняется:

$$L_{z_{\text{сист}}} = \sum_i L_{zi} = \sum_i I_{zi} \omega_{zi} = \text{const}, \qquad (68)$$

где L_{zi} и I_{zi} – моменты импульса и моменты инерции тел, входящих в систему, относительно оси Oz соответственно;

ω_{zi} – проекции векторов угловой скорости тел на ось Oz.

Задачи

71.(1) Скамья Жуковского представляет собой горизонтально расположенный диск, который может вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр диска. Человек с вытянутыми в стороны руками стоит в центре скамьи Жуковского, которая вращается с частотой 0,80 об/с. С какой частотой станет вращаться скамья с человеком, если человек прижмет руки к груди, изменив тем самым суммарный момент инерции системы в 1,2 раза?

72.(2) Горизонтально расположенная карусель в виде диска массой 5,0 кг и радиусом 60 см вращается с частотой 5,0 об/мин. На карусели лежит черепаха массой 1,0 кг. Край черепахи совпадает с краем карусели. С какой частотой станет вращаться система, если черепаха переползет в центр карусели? При расчетах черепаху считать диском радиусом 10 см.

73.(2) Карусель в виде однородного диска массой 160 кг радиусом 1,5 м вращается с частотой 1,0 об/с. В центре карусели стоит мальчик массой 35 кг. С какой частотой станет вращаться карусель, если мальчик со скоростью, направленной горизонтально вдоль радиуса карусели, перейдет на ее край? При расчете момента инерции мальчика считать материальной точкой.

74.(2) Человек стоит на скамье Жуковского и держит в руках стержень массой 3,1 кг и длиной 2,8 м, на концах которого закреплены шары. Центры шаров совпадают с концами стержня. Масса каждого шара равна 0,73 кг, радиус равен 15 см. При горизонтальном расположении стержня (когда центр стержня лежит на оси вращения) скамья вращается с частотой 0,80 об/с. С какой угловой скоростью будет вращаться скамья, если человек расположит стержень вертикально вдоль оси вращения? Момент инерции человека и платформы равен 22 кг·м^2.

75.(3) На краю горизонтальной платформы, имеющей форму диска радиусом 2,1 м, стоит человек. Масса платформы равна 200 кг, человека – 80 кг. Платформа может вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы. Пренебрегая трением, найти, с какой угловой скоростью будет вращаться платформа, если человек будет идти вдоль ее края со скоростью 1,9 м/с относительно платформы. Рассмотреть случаи: 1) платформа первоначально покоилась; 2) платформа первоначально вращалась с угловой скоростью 1,7 рад/с, а человек пошел в направлении вращения; 3) платформа первоначально вращалась с угловой скоростью 1,7 рад/с, а человек пошел в направлении, противоположном направлению вращения.

76.(3) На тонком вертикальном стержне длиной 0,30 м и массой 0,20 кг закреплен шар массой 600 г и радиусом 0,030 м. Центр шара совпадает с концом стержня. Стержень может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец. Пуля массой 15 г, летящая со скоростью 200 м/с под углом 30° вниз к горизонту по направлению к центру шара, попадает в шар и застревает в нем. На какой угол отклонится стержень после удара?

1.5. Элементы специальной теории относительности

Специальная теория относительности (СТО) основана на двух постулатах.

Первый постулат – *принцип относительности*: в любых инерциальных системах отсчета все физические явления при одних и тех же условиях протекают одинаково.

Второй постулат – *принцип постоянства скорости света*: во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит от скорости движения источника и приемника света.

Основные формулы, используемые при решении задач по разделу «Элементы специальной теории относительности», приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные законы и формулы раздела
«Элементы специальной теории относительности»

Номер п/п	Название закона, физической величины	Расчетная формула
1	2	3
1	Релятивистский закон сложения скоростей	$\upsilon_x = \dfrac{\upsilon_x{}' + u}{1 + \dfrac{\upsilon_x{}' u}{c^2}}$
2	Релятивистский эффект сокращения длины	$l = l_0\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}$
3	Релятивистский эффект замедления времени	$\tau = \dfrac{\tau_0}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}}$

1	2	3
4	Зависимость массы релятивистской частицы от скорости	$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{\upsilon^2}{c^2}}}$
5	Импульс релятивистской частицы	$\vec{p} = \dfrac{m_0\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\dfrac{\upsilon^2}{c^2}}}$
6	Закон взаимосвязи массы и энергии	$W = mc^2$, $\Delta W = \Delta mc^2$;
7	Энергия покоя	$W_0 = m_0c^2$
8	Кинетическая энергия релятивистской частицы	$W_k = mc^2 - m_0c^2$

Задачи

77.(1) Ионизированный атом, вылетев из ускорителя со скоростью 0,30 с, испустил фотон в направлении своего движения. Определить скорость фотона относительно ускорителя.

78.(2) Два протона движутся навстречу друг другу со скоростью 0,80 с относительно ускорителя. Найти скорость одного протона относительно другого.

79.(1) При какой скорости движения тела релятивистское сокращение его длины составит 40 %?

80.(1) Собственное время жизни частицы на 5,0 % отличается от времени жизни по неподвижным часам. Во сколько раз скорость частицы относительно неподвижных часов отличается от скорости света?

81.(2) При движении с некоторой скоростью продольные размеры тела изменились в три раза. Во сколько раз изменилась масса тела?

82.(1) Определить скорость, при которой релятивистский импульс частицы превышает классический в два раза.

83.(1) Определить кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью 0,90 с.

84.(1) При какой скорости кинетическая энергия частицы в два раза больше ее энергии покоя?

85.(2) Объем воды в Мировом океане приблизительно $1{,}3\cdot10^9$ км^3. На сколько увеличится масса воды в Мировом океане, если температура воды повысится на 2,0 ºС? Плотность воды в океане $1{,}03\cdot10^3$ кг/м^3.

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. Уравнение состояния идеального газа. Закон Дальтона

Идеальный газ – это система частиц, взаимодействующих друг с другом и со стенками сосуда только в кратковременных соударениях. Уравнение состояния идеального газа можно записать в нескольких формах, представим некоторые из них:

$$PV = \frac{m}{M}RT; \quad (69) \qquad\qquad P = nk_{\text{В}}T. \quad (70)$$

Если идеальный газ состоит из частиц нескольких сортов, то давление P идеального газа есть сумма давлений, которое оказывали бы частицы каждого сорта, если бы всех остальных не было (парциальные давления P_1, P_2, …). Это утверждение называется *законом Дальтона*:

$$P = P_1 + P_2 + ... + P_n. \quad (71)$$

Средняя кинетическая энергия теплового движения одной частицы идеального газа определяется формулой:

$$\langle W_k \rangle = \frac{i}{2}k_B T, \quad (72)$$

где i – число степеней свободы.

Суммарная кинетическая энергия хаотического движения молекул и потенциальная энергия их взаимодействия составляют внутреннюю энергию газа. Поскольку молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом (их потенциальная энергия равна нулю), то внутренняя энергия идеального газа есть энергия хаотического теплового движения:

$$W = \langle W_k \rangle N = \frac{i}{2}k_{\text{В}}T\nu N_A = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT. \quad (73)$$

Задачи

86.(1) Плотность газа при давлении 720 мм рт. ст. и температуре –20 °С равна 1,35 г/л. Найти массу киломоля газа.

87.(2) В сосуде объемом 30 л содержится идеальный газ при температуре 0 °С. После того, как часть газа была выпущена наружу, давление в сосуде понизилось на 0,78 атм (без изменения температуры). Найти массу выпущенного газа. Плотность данного газа при нормальных условиях 1,3 г/л.

88.(2) Газ массой 12 г занимает объем 4,2 л при температуре 11°С. После нагревания газа при постоянном давлении его плотность стала равной 1,8 мг/см^3. До какой температуры нагрели газ?

89.(2) Два сосуда с объемом 0,33 л и 0,75 л соединены трубкой с краном. До открытия крана в первом сосуде содержался азот под давлением 0,54 атм при температуре 0 °С, а во втором – аргон под давлением 1,5 атм при температуре 100 °С. Кран открывают, и газы смешиваются. Вычислить давление смеси, если ее температура равна 79 °С.

90.(2) Какой объем занимает смесь азота массой 50 г и гелия в количестве 1,8 моля при нормальных условиях (давление – 760 мм рт. ст., температура – 0 °С)?

91.(2) В баллоне емкостью 50 л находится 0,12 кмоля водорода при давлении 6,0 МПа. Определить среднюю кинетическую энергию теплового движения одной молекулы водорода. Какую часть этой энергии составляет энергия вращательного движения молекулы?

2.2. Распределения Максвелла и Больцмана

Функция распределения по скоростям частиц идеального газа, находящегося в статистическом равновесии, задаваемая формулой

$$f(\upsilon) = 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi k_B T}\right)^{3/2}\upsilon^2 \exp\left(-\frac{m_0\upsilon^2}{2k_B T}\right), \qquad (74)$$

называется *распределением Максвелла*.

Выражение (74) позволяет определить число молекул в объеме V, занимаемом идеальным газом, модули скоростей которых лежат в интервале значений от υ до $\upsilon + d\upsilon$:

$$dN(\upsilon) = Nf(\upsilon)\,d\upsilon, \tag{75}$$

где N – полное число частиц идеального газа.

Чтобы найти среднее число частиц ΔN, модули скоростей которых лежат в интервале значений от υ_1 до υ_2, необходимо проинтегрировать функцию (75) в заданных пределах:

$$\Delta N = \int_{\upsilon_1}^{\upsilon_2} dN(\upsilon) = N\int_{\upsilon_1}^{\upsilon_2} f(\upsilon)\,d\upsilon. \tag{76}$$

С помощью распределения Максвелла можно найти *наиболее вероятную скорость, среднее значение скорости и среднеквадратичную скорость,* которые равны соответственно:

$$\upsilon_{\text{н.в.}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}; \quad (77) \qquad \langle\upsilon\rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}; \quad (78) \qquad \upsilon_{\text{ск}} = \sqrt{\langle\upsilon^2\rangle} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (79)$$

Распределение частиц идеального газа во внешнем поле, в котором потенциальная энергия молекулы зависит только от ее координат, называется *распределением Больцмана* и задается формулой:

$$n(\vec{r}) = \frac{dN(\vec{r})}{dV} = n_0 \exp\left(-\frac{W_p(\vec{r})}{k_B T}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{W_p(x,y,z)}{k_B T}\right), \tag{80}$$

где $n(\vec{r})$ – концентрация частиц идеального газа в точке с радиусом-вектором $\vec{r}$;

n_0 – концентрация частиц в точках с нулевой потенциальной энергией.

Распределение концентрации частиц идеального газа и давления атмосферы на любом расстоянии от поверхности Земли в однородном поле силы тяжести определяется по так называемой *барометрической формуле*:

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{k_B T}\right); \quad (81) \qquad P(h) = P_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{k_B T}\right), \quad (82)$$

где n_0 – концентрация частиц идеального газа на высоте $h = 0$;

P_0 – давление идеального газа у поверхности Земли.

Заметим, что барометрическая формула справедлива при условии постоянства температуры для всех значений высоты.

92.(2) Определить температуру водорода, для которой средняя квадратичная скорость молекул больше их наиболее вероятной на 400 м/с.

93.(1) На рис. 4 представлены графики функции распределения Максвелла молекул некоторого идеального газа по скоростям. Как соотносятся значения температуры газа T_1, T_2 и T_3?

1) $T_1 > T_2 > T_3$; 2) $T_1 < T_2 < T_3$; 3) $T_1 = T_2 = T_3$.

94.(1) На рис. 4 представлены графики функции распределения Максвелла молекул водорода, гелия и кислорода по скорости. Температура газов одинакова. Для этих функций верными являются утверждения:

1) кривая 1 соответствует распределению по скорости молекул кислорода;

2) кривая 3 соответствует распределению по скорости молекул водорода;

3) кривая 1 соответствует распределению по скорости молекул гелия;

4) кривая 2 соответствует распределению по скорости молекул кислорода.

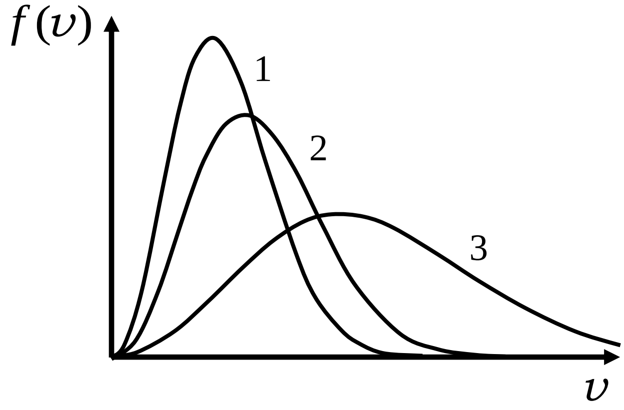

Рис. 4. Графики функции распределения Максвелла

95.(1) На какой высоте плотность газа вдвое меньше его плотности на уровне моря? Температуру газа считать постоянной и равной 0 °С. Задачу решить для: 1) кислорода; 2) азота.

96.(2) Найти давление воздуха на вершине горы Казбек (высота над уровнем моря – 5033 м). Температуру воздуха считать постоянной и равной 5 °С. Давление воздуха на уровне моря – 101,3 кПа. Молярная масса воздуха равна 29 г/моль.

2.3. Первый закон термодинамики. Адиабатный процесс

Первый закон термодинамики представляет собой закон сохранения энергии для тепловых процессов и может быть выражен формулой:

$$Q = \Delta W + A, \tag{83}$$

где Q – количество теплоты, переданное телу (термодинамической системе);

ΔW – приращение внутренней энергии тела, которое определяется в соответствии с выражением (73);

A – работа, совершенная телом над окружающей средой.

Работа A, совершаемая системой (газом) над окружающей средой в процессе перехода системы из состояния 1 в состояние 2, в общем случае выражается интегралом

$$A = \int_1^2 P dV \tag{84}$$

и зависит от вида процесса. Формулы для расчета работы газа в четырех изопроцессах приведены в табл. 3.

Таблица 3

Работа газа в изопроцессах

Название изопроцесса	Работа газа в изопроцессе 1–2
Изотермический (T = const)	$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$
Изохорный (V = const)	$A = 0$
Изобарный (P = const)	$A = P(V_2 - V_1)$
Изоэнтропический (S = const) или адиабатный ($\delta Q = 0$)	$A = \frac{i}{2}\nu R(T_1 - T_2)$

Задачи

97.(1) При сжатии 30 г водорода была совершена работа 1,2 кДж. При этом температура азота увеличилась на 50 °С. Определить затраченное количество теплоты.

98.(2) Открытая пустая пол-литровая стеклянная бутылка находится в комнате, воздух в ней имеет температуру +25 °С и давление 102 кПа. Бутылку плотно закрывают и выносят на улицу, где температура воздуха составляет –25 °С. Изобразить процесс графически на диаграмме «температура – давление». Как и на сколько изменится давление в бутылке после установления равновесия? Какое количество теплоты будет передано воздуху в бутылке?

99.(2) Азот, находившийся при температуре 27 °С, подвергли адиабатическому расширению, в результате которого его объем увеличился в пять раз, а внутренняя энергия уменьшилась на 4,0 кДж. Определить массу газа.

100.(2) Неон массой 80 г находился при температуре 400 К. Затем газ быстро расширился так, что не успел обменяться теплом с окружающей средой, при этом его объем увеличился в 6,5 раза. Изобразить процесс графически на диаграмме «давление – объем». Найти температуру в конце расширения и работу, совершенную газом.

101.(2) В цилиндре под поршнем находится кислород массой 40 г при температуре 500 К. Давление в цилиндре – 70 кПа. Газ очень медленно сжимают, сдвигая поршень так, что объем газа уменьшается в 3,5 раза. Изобразить процесс графически на диаграмме «давление – объем». Найти давление в конце сжатия и работу, совершенную над газом внешними силами.

102.(2) Один киломоль одноатомного газа, находящегося при температуре 27 °С, охлаждается изохорно, вследствие чего его давление уменьшается в два раза. Затем газ изобарически расширяется так, что в конечном состоянии его температура равна первоначальной. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем». Вычислить количество теплоты, поглощенной газом, произведенную им работу и приращение внутренней энергии газа.

103.(2) Идеальный газ, занимающий объем 0,39 $м^3$ при давлении 155 кПа, изотермически расширяется до десятикратного объема, затем изохорно нагревается так, что в конечном состоянии его давление равно первоначальному. В результате этих процессов газу сообщается 1,5 МДж тепла. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем». Найти число степеней свободы молекул газа.

104.(2) В цилиндре под поршнем находится водород массой 20 г при температуре 300 К. Водород сначала расширился адиабатически, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Изобразить процесс графически на диаграмме «давление – температура». Найти температуру в конце адиабатического расширения и полную работу, совершенную газом.

105.(2) Углекислый газ массой 500 г, находящийся под давлением 0,5 МПа при температуре 127 °С, подвергли изотермическому расширению, в результате которого давление газа уменьшилось в три раза. После этого газ подвергли изобарному сжатию до первоначального объема, затем его давление было изохорно увеличено до первоначального значения. Изобразить цикл на диаграмме «давление – объем». Определить изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную газом, и количество теплоты, полученной газом за цикл.

2.4. Теплоемкость. Энтропия. Цикл Карно

Теплоемкость идеального газа. Теплоемкость тела определяется по формуле:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \qquad (85)$$

Теплоемкость газа зависит от того, в каком процессе нагревается газ. Теплоемкость при постоянном давлении (C_P) всегда больше теплоемкости при постоянном объеме (C_V), так как количество теплоты расходуется не только на нагревание (т. е. увеличение внутренней энергии), но и на совершение работы.

Удельная и молярная теплоемкость однородного вещества определяется соответственно формулами:

$$c_m = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{m dT}; \quad (86) \qquad\qquad c_\nu = \frac{C}{\nu} = \frac{\delta Q}{\nu dT}. \quad (87)$$

Из уравнения состояния идеального газа и первого начала термодинамики получаются следующие формулы для определения молярной теплоемкости газов:

$$c_{\nu V} = \frac{i}{2} R, \quad (88) \qquad\qquad c_{\nu P} = \frac{i+2}{2} R. \quad (89)$$

Отношение $c_{\nu P} / c_{\nu V} = \dfrac{i+2}{i} = \gamma$ называется показателем адиабаты.

Энтропия наряду с давлением, объемом и температурой является функцией состояния системы, однако в отличие от этих трех функций состояния энтропия определена не только для равновесных состояний, но и для любых других.

Термодинамическим определением энтропии является формула, позволяющая определить лишь приращение энтропии:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \qquad (90)$$

где δQ – количество теплоты, сообщенное системе на бесконечно малом участке какого-либо процесса при температуре T. Для конечного обратимого процесса, в результате которого система переходит из начального состояния 1 в конечное состояние 2, изменение энтропии определяется формулой:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (91)$$

Формулы для расчета приращения энтропии в изопроцессах приведены в табл. 4.

Таблица 4

Приращение энтропии в изопроцессах

Название изопроцесса	Изменение энтропии в изопроцессе 1–2
Изотермический (T = const)	$\Delta S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}$
Изохорный (V = const)	$\Delta S = \nu C_{\nu V} \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изобарный (P = const)	$\Delta S = \nu C_{\nu P} \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изоэнтропический (S = const) или адиабатный ($\delta Q = 0$)	$\Delta S = 0$

Тепловые машины, цикл Карно. Тепловая машина (тепловой двигатель) – это устройство, предназначенное для преобразования внутренней энергии в механическую работу. Устройство тепловых машин может быть различным, но в любом тепловом двигателе есть три основных элемента: нагреватель, холодильник и рабочее тело. Тепловой двигатель функционирует таким образом, что рабочее тело получает некоторое количество теплоты $Q_н$ от нагревателя, совершает полезную работу A, а затем отдает некоторое количество теплоты $Q_х$ холодильнику. Это описание многократно повторяющегося цикла работы теплового двигателя.

Важнейшая количественная характеристика эффективности работы теплового двигателя, как и любого технического устройства, это коэффициент полезного действия (КПД), который определяется по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_н} = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н}. \quad (92)$$

Важно уметь оценивать максимально возможный КПД.

Циклический процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатных процессов, назван циклом Карно, а тепловой двигатель, работающий по циклу Карно, – идеальным тепловым двигателем. Теоретическая модель Карно позволяет рассчитать максимально возможный КПД при данных значениях температуры $T_н$ нагревателя и $T_х$ холодильника:

$$\eta_К = 1 - \frac{T_х}{T_н}. \quad (93)$$

Задачи

106.(2) При температуре 480 К некоторый газ массой 2,5 кг занимает объем 800 л. Определить давление газа, если его удельная теплоемкость при постоянном давлении равна 519 Дж/(кг·К), а отношение теплоемкостей равно 1,67.

107.(2) Некоторый газ при нормальных условиях имеет плотность 0,089 кг/м^3. Определить его удельную теплоемкость при постоянном объеме. Какой это газ?

108.(2) Некоторый газ при давлении 1,0 МПа и температуре 400 К имеет удельный объем 0,104 м^3/кг. Определить для этого газа отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме, если наибольшая из них равна 910 Дж/(кг·К).

109.(2) Энтропия одного моля идеального газа при температуре 25 °С и давлении 100 кПа равна 204,8 Дж/К. В результате изотермического расширения объем, занимаемый газом, увеличился до 50 л. Определить энтропию газа в конечном состоянии.

110.(2) В одном сосуде, объем которого равен 1,6 л, находится 14 мг азота, в другом сосуде объемом 3,4 л – 16 мг кислорода. Температура газов одинаковая. Сосуды соединяют, и газы перемешиваются без изменения температуры. Найти приращение энтропии в этом процессе.

111.(2) 1000 моль двухатомного идеального газа, находящегося при некоторой температуре, охлаждается изохорически, вследствие чего его давление уменьшается в два раза. Затем газ изобарически расширяется так, что в конечном состоянии его температура равна первоначальной. Найти приращение энтропии.

112.(2) Найти приращение энтропии при конденсации 800 г водяного пара, находящегося при температуре 100 °С, и последующем охлаждении воды до температуры 20 °С. Теплоемкость воды считать не зависящей от температуры окружающей среды. Конденсация происходит при давлении 760 мм рт. ст.

113.(1) Газ, совершающий цикл Карно, отдает холодильнику 2/3 количества теплоты, полученной от нагревателя. Температура холодильника равна 0 °С. Определить температуру нагревателя.

114.(1) Газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в три раза выше температуры холодильника. Нагреватель передает газу количество теплоты 41,9 кДж. Какую работу совершил газ? Найти КПД машины.

115.(1) Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя равна 220 °С, температура холодильника равна 17 °С. При изотермическом расширении газ совершает работу 120 Дж. Определить количество теплоты, которое газ отдает холодильнику при изотермическом сжатии.

Библиографический список

1. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М., 2006. 560 с.

2. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М., 2003. 607 с.

3. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. М., 2007. Т. 1. 432 с.

4. Оселедчик Ю. С. / Физика. Модульный курс: Учебное пособие / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. М., 2012.

5. Чертов А. Г. Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. М., 2001. 640 с.

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П. 1

Некоторые физические постоянные

Физическая постоянная	Значение
Гравитационная постоянная G, Н·м^2/кг^2	$6{,}672 \cdot 10^{-11}$
Ускорение свободного падения g, м/с^2	9,80665
Скорость света c, м/с	$2{,}9979 \cdot 10^{8}$
Масса покоя электрона m_e, кг	$9{,}1095 \cdot 10^{-31}$
Масса покоя протона m_p, кг	$1{,}6726 \cdot 10^{-27}$
Масса Земли, кг	$5{,}976 \cdot 10^{24}$
Средний радиус Земли, м	$6{,}371 \cdot 10^{6}$
Время полного оборота Земли вокруг своей оси, с	86164
Постоянная Больцмана k_B, Дж/К	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$
Универсальная газовая постоянная R, Дж/(моль·К)	8,31
Число Авогадро N_A, моль$^{-1}$	$6{,}022 \cdot 10^{23}$

Таблица П. 2

Молярная масса и число степеней свободы (поступательных и вращательных) молекул некоторых газов

Газ	Молярная масса М, г/моль	Число степеней свободы i
Водород (H_2)	2	5
Гелий (He)	4	3
Водяной пар (H_2O)	18	6
Неон (Ne)	20	3
Азот (N_2)	28	5
Кислород (O_2)	32	5
Аргон (Ar)	40	3
Углекислый газ (CO_2)	44	6

Таблица П.3

Плотность и тепловые свойства воды

Плотность, кг/м^3	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Удельная теплота парообразования, МДж/кг
1000	4,19	2,25

Таблица П.4

Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
деци	д	10^{-1}	дека	да	10^{1}
санти	с	10^{-2}	гекто	г	10^{2}
милли	м	10^{-3}	кило	к	10^{3}
микро	мк	10^{-6}	мега	М	10^{6}
нано	н	10^{-9}	гига	Г	10^{9}
пико	п	10^{-12}	тера	Т	10^{12}

Примечания.

1 (физическая) атмосфера (1 атм.) = 101,325 кПа.

1 миллиметр ртутного столба (1 мм рт. ст.) = 133,322 Па.

1 атомная единица массы (1 а. е. м.) = 1, 66057$\cdot 10^{-27}$ кг.

1 литр (1 л) = 10^{-3} м^3.

T, К = t, °С + 273

1 ккал = 4190 Дж

Учебное издание

ГЕЛЬВЕР Сергей Александрович, ГОНЧАР Игорь Иванович,
ДРОЗДОВА Илга Анатольевна, КРОХИН Сергей Николаевич,
ЛИТНЕВСКИЙ Леонид Аркадьевич, МИНАБУДИНОВА Сания Анасовна,
ХМЫРОВА Наталья Анатольевна

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Часть 1

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Редактор Н. А. Майорова
Корректор И. А. Сенеджук

***

Подписано в печать 22.10.2014. Формат 60 × 84 $^{1}/_{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,7. Уч.-изд. л. 3,0.
Тираж 1000 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

ЧАСТЬ 1

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ОМСК 2014