МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра физики

ФИЗИКА

ЧАСТЬ 1
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Программа, методические указания и контрольные задания
для студентов Института безотрывных форм обучения

Санкт-Петербург
2019

УДК 531(075)
ББК 22.3я7
Ф 503

ФИЗИКА. Часть 1. Физические основы механики. Физические основы молекулярной физики и термодинамики. Программа, методические указания и контрольные задания для студентов Института безотрывных форм обучения / сост. Е.А. Яшкевич, А.Л. Ашкалунин; – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД.2019.– 46 с.

Пособие содержит программу, методические указания, примеры решения задач и контрольные задания по двум разделам курса физики, посвященным механике, молекулярной физике и термодинамике.

Рецензент: доцент кафедры физики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. хим. наук В.О. Кабанов.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 5 от 11.02.2019 г.).

Утверждено к изданию методической комиссией института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (№ 7 от 04.04.2019 г.).

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом СПбГУПТД в качестве учебно-методического пособия.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Настоящее пособие содержит материалы по первому и второму разделам курса физики: «Механика» и «Молекулярная физика и термодинамика». Дана таблица вариантов контрольной работы № 1, которая состоит из шести задач: три задачи по первому и три – по второму разделам. Контрольная работа предоставляется для проверки согласно учебному плану. Номер варианта контрольной работы совпадает с последней цифрой шифра студента.

Таблица

Вариант	Номера задач в контрольной работе № 1					
1	11	31	51	91	111	131
2	12	32	52	92	112	132
3	13	33	53	93	113	133
4	14	34	54	94	114	134
5	15	35	55	95	115	135
6	16	36	56	96	116	136
7	17	37	57	97	117	137
8	18	38	58	98	118	138
9	19	39	59	99	119	139
10	20	30	60	100	120	140

При выполнении контрольных работ необходимо выполнять следующие правила:

1) каждую контрольную работу выполнять в отдельной тетради;

2) на титульном листе нужно указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес;

3) контрольную работу следует выполнять аккуратно, писать разборчиво, оставляя поля для замечаний рецензента;

4) условие задачи с указанием номера переписывать полностью, а заданные числовые значения выписывать отдельно «в столбик», переводя их в систему СИ;

5) там, где это необходимо для решения, сделать чертеж или рисунок;

6) решение задачи должно сопровождаться необходимыми пояснениями;

7) в пояснениях к задаче необходимо указать основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи;

8) при получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод с указанием, что значит каждая используемая буква;

9) основные законы и формулы, приведенные в данном пособии, выводить не надо;

10) не рекомендуется в решении одной задачи использовать одну и ту же букву для обозначения различных величин;

11) рекомендуется решение задачи сначала сделать в общем виде, то есть в буквенных обозначениях;

12) вычисления следует проводить подстановкой заданных числовых значений в расчетную формулу. Все числовые значения величин должны быть выражены в СИ;

13) проверить единицы измерения полученных величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить правильность расчетной формулы;

14) в контрольной работе следует указать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, в которых номера задач не соответствуют нужному варианту, рецензироваться не будут.

При повторном рецензировании обязательно представлять первоначальный вариант с первой рецензией.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
Физические основы механики

Кинематика материальной точки. Скорость, ускорение при движении по прямолинейной траектории и по окружности. Угловая скорость. Угловое ускорение. Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея. Инварианты преобразования Галилея. Постулаты теории относительности. Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца. Инварианты преобразований Лоренца. Релятивистские скорость и импульс. Энергия в релятивистской механике. Полная энергия тела. Энергия покоя. Масса покоя. Релятивистское выражение для массы.

Динамика материальной точки и тела, движущихся поступательно. Инерциальные системы отсчета. Понятия массы, импульса и силы. Законы Ньютона. Основные фундаментальные взаимодействия. Силы.

Понятия замкнутой системы, внутренних и внешних сил. Импульс. Закон сохранения импульса. Кинетическая энергия. Работа. Мощность. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Полная механическая энергия частицы. Потенциальная энергия взаимодействия двух тел.

Динамика вращательного движения. Момент силы. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Момент инерции. Основное уравнение динамики вращательного движения. Теорема Штейнера. Кинетическая энергия вращательного движения. Работа при вращательном движении.

Колебательное движение. Гармонические колебания. Амплитуда, период и частота колебаний. Маятники. Превращение энергии при гармонических колебаниях. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты. Биения.

Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Логарифмический декремент затухания. Добротность контура. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Резонанс.

Распространение механических волн в упругих средах. Продольные, поперечные и стоячие волны. Волновое уравнение.

Физические основы молекулярной физики и термодинамики

Молекулярно-кинетическая теория. Давление и температура в МКТ. Распределение кинетической энергии по степеням свободы. Поступательные, вращательные и колебательные степени свободы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Распределение Максвелла. Распределение Больцмана.

Явления переноса в газах. Средняя длина свободного пробега. Понятие эффективного диаметра. Диффузия. Теплопроводность. Внутреннее трение.

Введение в термодинамику. Температура и термодинамическое равновесие. Термодинамическая система. Термодинамический процесс. Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа.

Внутренняя энергия и работа. Первое начало термодинамики. Теплоемкость идеального газа. Молярная и удельная теплоемкость. Теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении.

Постулаты второго начала термодинамики. Обратимый и необратимый процесс. Коэффициент полезного действия. Цикл Карно. Теорема Карно. Энтропия термодинамической системы. Закон возрастания энтропии.

Реальные газы. Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа. Фазовые переходы первого и второго рода. Диаграмма состояния и тройная точка.

I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ
Основные законы и формулы

Таблица 1

Величина или физический закон	**Формула**
1	2
Средняя скорость	$\upsilon_{ср} = \dfrac{s}{t}$, где s – путь
Мгновенная скорость	$\vec{\upsilon}_{мгнов} = \dfrac{d\vec{r}}{dt}$, где $\vec{r}$ – радиус-вектор
Мгновенное ускорение	$\vec{a} = \dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \dfrac{d^2\vec{r}}{dt^2}$

Продолжение табл.1

1	2
Тангенциальное ускорение	$\vec{a}_\tau = \dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt}$
Нормальное ускорение	$\vec{a}_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}\vec{n}$, где R – радиус кривизны траектории, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали
Полное ускорение	$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, $a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$
Угловая скорость	$\omega = \dfrac{d\varphi}{dt}$, где φ – угол поворота
Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon} = \dfrac{d\vec{\omega}}{dt}$
Связь между поступательными и вращательными величинами	$s = \varphi R$, $\upsilon = \omega R$, $a_\tau = \varepsilon R$, $a_n = \omega^2 R$
Импульс	$\vec{p} = m\vec{\upsilon}$, где m – масса тела
Закон сохранения импульса (ЗСИ) для замкнутой системы тел	$\sum \vec{p}_i = \sum \left(m_i \vec{\upsilon}_i\right) = const$
ЗСИ при упругом ударе двух тел	$m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 = m_1\vec{\upsilon}'_1 + m_2\vec{\upsilon}'_2$
ЗСИ при неупругом ударе двух тел	$m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 = (m_1 + m_2)\vec{\upsilon}$
Основное уравнение динамики поступательного движения	$\vec{F} = m\vec{a}$, $\vec{F} = \dfrac{d\vec{p}}{dt}$
Связь силы сухого трения и реакции опоры	$F_{тр} = \mu N$, где N – реакция опоры, μ – коэффициент трения
Сила упругости	$F_{упр} = -kx$, где k – коэффициент упругости, x – абсолютная деформация
Сила гравитационного взаимодействия двух тел	$F_{гравит} = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$, где r – расстояние между телами, G – гравитационная постоянная

Продолжение табл.1

1	2
Напряженность гравитационного поля Земли	$g = G\dfrac{M}{r^2}$, где r – расстояние от центра Земли, M – масса Земли
Работа силы	$A = \int \vec{F}d\vec{l}$, $A = Fl\cos\alpha$, где dl – элементарное перемещение тела, α – угол между силой и перемещением
Мощность	$N = \dfrac{dA}{dt} = \vec{F}\vec{\upsilon}$
Кинетическая энергия поступательного движения	$E_K = \dfrac{m\upsilon^2}{2} = \dfrac{p^2}{2m}$
Потенциальная энергия тела в однородном гравитационном поле	$E_П = mgh$, где h – расстояние от нулевого уровня отсчета энергии
Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух тел	$E_П = -G\dfrac{m_1m_2}{r}$
Потенциальная энергия упругодеформированного тела	$E_П = \dfrac{kx^2}{2}$
Закон сохранения механической энергии	$E = E_K + E_П = const$
Момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс:	$J = \sum\limits_i m_i r_i^2$
Полого тонкостенного цилиндра или тонкого кольца радиусом R (ось вращения совпадает с осью цилиндра или кольца)	$J_0 = mR^2$
Сплошного цилиндра или диска радиусом R (ось вращения совпадает с осью цилиндра или диска)	$J_0 = \dfrac{1}{2}mR^2$
Момент инерции шара радиусом R	$J_0 = \dfrac{2}{5}mR^2$

Продолжение табл.1

1	2
Стержня длиной l (ось вращения перпендикулярна стержню)	$J_0 = \frac{1}{12} ml^2$
Момент инерции тела относительно произвольной оси	$J = J_0 + ma^2$, где a – расстояние между произвольной осью и осью, проходящей через центр масс
Момент силы	$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$, где r – радиус-вектор точки приложения силы
Модуль момента силы	$M = r \cdot F \cdot \sin\alpha = F \cdot l$, где $l = r \cdot \sin\alpha$ – плечо силы, α – угол между векторами $\vec{F}$ и $\vec{r}$
Момент импульса	$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}]$, $\vec{L} = J\vec{\omega}$
Основное уравнение динамики вращательного движения	$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = J\vec{\varepsilon}$
Закон сохранения Момента импульса для замкнутой системы тел	$\sum \vec{L}_i = \sum \left(J_i \vec{\omega}_i\right) = const$
Работа при вращательном движении	$A = \int M d\varphi$
Кинетическая энергия вращающегося тела	$E_K = \frac{J\omega^2}{2}$
Уравнение гармонических колебаний материальной точки	$x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$, где A – амплитуда колебания, $\omega t + \varphi_0 = \varphi$ – фаза колебания, φ_0 – начальная фаза, ω – циклическая частота
Скорость гармонически колеблющейся материальной точки	$\upsilon = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$
Ускорение гармонически колеблющейся материальной точки	$a = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0)$
Период колебаний	$T = \frac{1}{\nu}$, где ν – частота колебаний

Продолжение табл.1

1	2
Связь колебательных параметров	$\omega = 2\pi\nu$, $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$
Период колебаний математического маятника	$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$, где l – длина маятника, g – ускорение свободного падения
Период колебаний пружинного маятника	$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$, где m – масса тела, k – коэффициент жесткости пружины
Период колебаний физического маятника	$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{J}{lmg}}$
Логарифмический декремент затухания	$\delta = \ln(A_i / A_{n+1}) = \left(1/n\right)\ln\left(A_0 / A_n\right)$
Длина волны	$\lambda = T \cdot \upsilon = \dfrac{\upsilon}{\nu}$, где υ – скорость распространения волны, ν – частота колебаний
Уравнение плоской бегущей волны, распространяющейся вдоль оси x	$y(x,t) = A\cos(\omega t - kx - \varphi_0)$, где $\kappa = \dfrac{2\pi}{\lambda} = \dfrac{2\pi}{\upsilon T} = \dfrac{\omega}{\upsilon}$ – волновое число, υ – скорость распространения волны
Преобразования Лоренца для координат и времени (при движении со скоростью v одной системы отсчета относительно другой системы вдоль оси x)	$x = \dfrac{x' + \upsilon t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $\quad x' = \dfrac{x - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $y = y'$ $\quad y' = y$ $z = z'$ $\quad z' = z$, $t = \dfrac{t' + \upsilon x'/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $\quad t' = \dfrac{t - \upsilon x/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ где $\beta = \dfrac{\upsilon}{c}$, c – скорость света в вакууме

Окончание табл.1

1	2
Теорема сложения скоростей	$u' = \dfrac{u \mp V}{1 \mp \dfrac{uV}{c^2}}$, где u и u' – скорости тела в двух системах K и K', движущихся относительно друг друга со скоростью V, знак «–» ставится при совпадении направления скоростей u и V
Релятивистское сокращение длины	$l = l_0\sqrt{1-\beta^2}$, где l_0 – длина покоящегося тела
Релятивистское замедление времени	$t = \dfrac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, где t_0 – собственное время
Релятивистская масса	$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, где m_0 – масса покоя частицы
Релятивистский импульс	$\vec{p} = m\bar{\upsilon} = \dfrac{m_0\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\beta^2}}$
Основной закон релятивистской динамики материальной точки	$\vec{F} = \dfrac{d\vec{p}}{dt} = \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{m\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)$
Полная энергия релятивистской частицы	$E = mc^2 = \dfrac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$
Энергия покоя частицы	$E_0 = m_0c^2$
Связь между релятивистскими импульсом и энергией частицы	$E^2 = p^2c^2 + E_0^2$

Примеры решения задач

Пример 1

Уравнение движения материальной точки вдоль оси имеет вид $x = 2 + t - 0{,}5t^3$, где $A = 2$ м, $B = 1$ м/с, $C = -0{,}5$ м/с^3. Найти координату x, скорость υ_x и ускорение a_x точки в момент времени $t = 2$ с.

Дано: $x = 2 + t - 0{,}5t^3$, где $A = 2$ м, $B = 1$ м/с, $C = -0{,}5$ м/с^3, $t = 2$ с.

Найти: x, υ_x, a_x.

Решение. Координату x найдем, подставив в уравнение движения значение времени: $x = \left(2 + 1 \cdot 2 - 0{,}5 \cdot 2^3\right) = 0$. Мгновенная скорость относительно оси x есть первая производная от координаты по времени: $\upsilon_x = \dfrac{dx}{dt} = B + 3Ct^2$. Ускорение точки найдем, взяв первую производную скорости по времени: $a_x = \dfrac{d\upsilon_x}{dt} = 6Ct$. В момент времени $t = 2$ с: $\upsilon_x = -5$ м/с; $a_x = -6$ м/с^2.

Ответ: $x = 0$, $\upsilon_x = -5$ м/с, $a_x = -6$ м/с^2.

Пример 2

Тело вращается вокруг неподвижной оси по закону $\varphi = 10 + 20t - 2t^2$. Найти полное ускорение точки, находящейся на расстоянии $r = 0{,}1$ м от оси вращения, для момента времени $t = 4$ с.

Дано: $\varphi = 10 + 20t - 2t^2$, $r = 0{,}1$ м, $t = 4$ с.

Найти: a.

Решение. Полное ускорение $\vec{a}$ точки, движущейся по кривой линии, может быть найдено как геометрическая сумма тангенциального ускорения $\vec{a}_\tau$, направленного по касательной к траектории, и нормального ускорения $\vec{a}_n$, направленного к центру кривизны траектории (см. рис. 1): $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$. Так как векторы $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$ взаимно

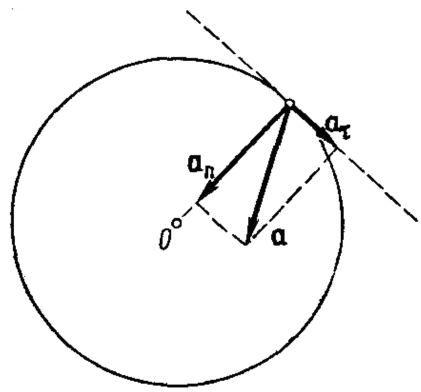

Рис. 1

перпендикулярны, то модуль ускорения $a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$ (1). Модули тангенциального и нормального ускорения точки вращающегося тела выражаются формулами $a_\tau = \varepsilon r$ и $a_n = \omega^2 r$, где ω – модуль угловой скорости тела; ε – модуль его углового ускорения. Подставляя выражения a_τ и a_n в формулу (1), находим $a = \sqrt{\varepsilon^2 r^2 + \omega^4 r^2} = r\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}$ (2). Угловую скорость ω найдем, взяв первую производную угла поворота по времени: $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 2Ct$. В момент времени $t = 4$ с модуль угловой скорости $\omega = 4$ рад/с. Угловое ускорение найдем, взяв первую производную от угловой скорости по времени: $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = 2C = -4$ рад/с^2. Подставляя значения ω, ε и r в формулу (2), получаем $a = 1{,}65$ м/с^2.

Ответ: $a = 1{,}65$ м/с^2.

Пример 3

Тело брошено под углом к горизонту с начальной скоростью 10 м/с под углом 30^0 к горизонту. Найти максимальную высоту подъема тела и дальность полета, а также нормальное и тангенциальное ускорения в момент времени 1,25 с после начала движения.

Дано: $V_0 = 10$ м/с**,** α=30^0

Найти: $h_{\max}$, L, a_n, a_τ.

Решение. Движение тела, брошенного под углом к горизонту, состоит из двух независимых движений: равномерного со скоростью $V_X = V_{0X} = V_0 \cos\alpha$ по горизонтали и равноускоренного со скоростью $V_Y = V_0 \sin\alpha - gt$ по вертикали. Время движения по горизонтали в два раза большее за время подъема тела на максимальную высоту. В самой высокой точке траектории движение

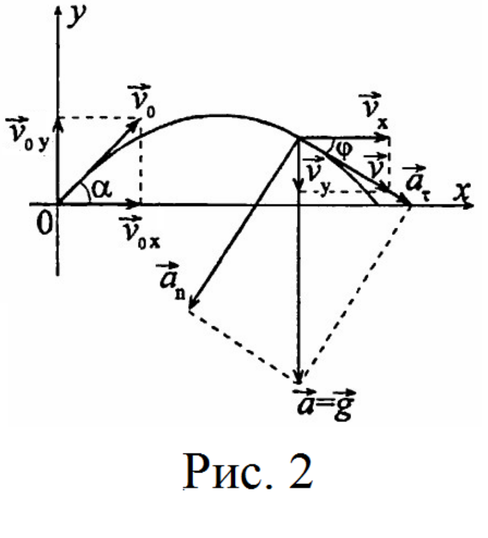

Рис. 2

тела (вершина параболы) вертикальная составляющая скорости равна нулю.

Пусть начальная скорость V_0, а угол, который она составляет с горизонтом, — α.

Это движение равноускоренное с ускорением **g**, которое происходит только под действием силы тяжести. Значит, мгновенная скорость **v** изменяется по закону: $V = V_0 + gt$ (1). В проекции на ось OX $V_X = V_{0X} = V_0 \cos\alpha$ (2). Горизонтальная составляющая скорости V_x от времени не зависит, т.е. по горизонтали движение равномерное. Это является результатом того, что в горизонтальном направлении на тело не действует сила. В проекции на ось OY уравнение (1) получим: $V_Y = V_{0Y} - gt$. Так как $V_{0Y} = V_0 \sin\alpha$, тогда $V_Y = V_0 \sin\alpha - gt$ (3).

Формулы (1) — (3) позволяют записать законы движения тела в вертикальном и горизонтальном направлениях: $x = V_0 \cos\alpha \cdot t$ (4) и $y = V_0 \sin\alpha \cdot t - \dfrac{gt^2}{2}$ (5). Максимальное значение x есть дальность полета L тела. Значит, $L = V_0 \cos\alpha \cdot t_{полета}$ (6). Время полета равно удвоенному времени подъема. За время, равное времени подъема, вертикальная составляющая скорости V_y обращается в ноль: $0 = V_0 \sin\alpha - gt_{подъема}$. Отсюда $t_{подъема} = \dfrac{V_0 \sin\alpha}{g}$ (7).

Подставив в (6), получим $L = V_0 \cos\alpha \cdot \dfrac{2V_0 \sin\alpha}{g} = \dfrac{V_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$. Максимальная высота подъема достигается в момент времени $t = t_{подъема}$, значит $h_{\max} = V_0 \sin\alpha \cdot t_{подъема} - \dfrac{gt_{подъема}^2}{2} = \dfrac{V_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$.

В момент времен 1,25 с тело находится на спуске. Можно представить, что тело бросили горизонтально со скоростью $V_X = V_{0X} = V_0 \cos\alpha$ и необходимо найти ускорения тела в момент времени $t_2 = t - t_{подъема} = 1{,}25 - 1 = 0{,}25$ с. Покажем на рисунке нормальное a_n и тангенциальное a_τ ускорения. Построим треугольник ускорений. Тангенциальное ускорение направлено по касательной к траектории движения, нормальное ускорение –

перпендикулярно тангенциальному ускорению. Из рисунка видно, что $\cos\varphi = V_x / V = a_n / g$, $\sin\varphi = V_Y / V = a_\tau / g$. Отсюда $a_n = g\dfrac{V_x}{V}$ и $a_\tau = g\dfrac{V_Y}{V}$. Полная скорость тела $V = \sqrt{V_x^2 + V_Y^2} = \sqrt{(V_0\cos\alpha)^2 + (gt_2)^2}$.

Тогда $a_n = g\dfrac{V_0\cos\alpha}{\sqrt{(V_0\cos\alpha)^2 + (gt_2)^2}}$, $a_\tau = g\dfrac{gt_2}{\sqrt{(V_0\cos\alpha)^2 + (gt_2)^2}}$.

Подставив числовые значения, получим $h_{\max} = 1{,}25$ м, $L = 8{,}7\,м$, a_n=9,43 м/с^2, a_τ=2,67 м/с^2.

Ответ: h_{max} =1,25 м, $L = 8{,}7\,м$, a_n=9,43 м/с^2, a_τ=2,67 м/с^2.

Пример 4

Маховик в виде сплошного диска радиусом $R = 0{,}2$ м и массой $m = 50$ кг раскручен до частоты вращения $n_1 = 480$ мин$^{-1}$ и предоставлен сам себе. Под действием сил трения маховик остановился через $t = 50$ с. Найти момент M сил трения.

Дано: $R = 0{,}2$ м, $m = 50$ кг, $n_1 = 480$ мин$^{-1}$, $t = 50$ с.

Найти: M .

Решение. Для решения задачи воспользуемся основным уравнением динамики вращательного движения в виде $dL_z = M_z dt$, где dL_z – изменение проекции на ось z момента импульса маховика, вращающегося относительно оси *z*, совпадающей с геометрической осью маховика, за интервал времени dt; M_z – момент внешних сил (в данном случае – момент сил трения), действующих на маховик относительно оси *z*. Момент сил трения можно считать не изменяющимся с течением времени ($M_z = const$), поэтому интегрирование уравнения (1) приводит к выражению $\Delta L_z = M_z\Delta t$ (2). При вращении твердого тела относительно неподвижной оси изменение проекции момента импульса $\Delta L_z = J_z\Delta\omega$ (3), где J_z – момент инерции маховика относительно оси z; $\Delta\omega$ – изменение угловой скорости маховика. Приравняв правые части равенств (2) и (3), получим $M_z\Delta t = J_z\Delta\omega$, откуда $M_z = J_z\dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}$ (4). Момент инерции сплошного диска определяется по формуле $J_z = \frac{1}{2} mR^2$. Изменение угловой скорости $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ выразим через конечную n_2 и начальную n_1 частоты вращения, пользуясь соотношением $\omega = 2\pi n$: $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = 2\pi(n_2 - n_1)$. Подставив в формулу (4) выражения J_z и $\Delta\omega$, получим $M_z = \frac{\pi m R^2 (n_2 - n_1)}{\Delta t}$. Произведем вычисления: $M_z = -1$ Н·м. Знак «минус» показывает, что момент сил трения оказывает на маховик тормозящее действие.

Ответ: $M_z = -1$ Н·м.

Пример 5

Тонкий стержень массой 300 г и длиной 50 см вращается с угловой скоростью 10 с$^{-1}$ в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через середину стержня. Найти угловую скорость, если в процессе вращения в той же плоскости стержень переместится так, что ось вращения пройдет через конец стержня.

Дано: $m = 0{,}3\,кг$, $l = 0{,}5\,м$, $\varpi_1 = 10$ с$^{-1}$.

Найти: ω_2.

Решение. Согласно закону сохранения момента импульса: $\sum_{i=1}^{n} J_i \omega_i = const$ (1), где J_i – момент инерции стержня относительно оси вращения. Для изолированной системы тел векторная сумма моментов импульсов остается постоянной. В данной задаче, вследствие того, что распределение массы стержня относительно оси вращения изменяется, момент инерции стержня так же изменяется. В соответствии с (1) запишем $J_1\omega_1 = J_2\omega_2$ (2). Момент инерции стержня относительно оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной стержню, равен $J_0 = \frac{ml^2}{12}$ (3). По теореме Штейнера $J = J_0 + md^2$, где J – момент инерции тела относительно произвольной оси вращения; J_0 – момент инерции относительно параллельной оси, проходящей через центр масс; d – расстояние от центра масс до выбранной оси вращения. Найдем момент инерции стержня относительно оси, проходящей через его конец и перпендикулярной стержню: $J_2 = J_0 + md^2 = \frac{ml^2}{12} + m\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{ml^2}{3}$ (4). Подставляя формулы (3) и (4) в (2), получаем $\frac{ml^2\omega_1}{12} = \frac{ml^2\omega_2}{3}$, откуда $\omega_2 = \omega_1 / 4 = 2{,}5$ с$^{-1}$.

Ответ: $\omega_2 = 2{,}5$ с$^{-1}$.

Пример 6

Платформа в виде сплошного диска радиусом $R = 1{,}5$ м и массой $m_1 = 180$ кг вращается около вертикальной оси с частотой $n = 10$ мин$^{-1}$. В центре платформы стоит человек массой $m_2 = 60$ кг. Какую линейную скорость относительно пола будет иметь человек, если он перейдет на край платформы?

Дано: $R = 1{,}5$ м, $m_1 = 180$ кг, $n = 10$ мин$^{-1}$, $m_2 = 60$ кг.

Найти: υ

Решение. Согласно условию задачи, момент внешних сил относительно оси вращения *z*, совпадающей с геометрической осью платформы, можно считать равным нулю. При этом условии проекция L_z момента импульса системы платформа – человек остается постоянной: $L_z = J_z\omega = const$ (1), где J_z – момент инерции платформы с человеком относительно оси *z*; ω – угловая скорость платформы. Момент инерции системы равен сумме моментов инерции тел, входящих в состав системы, поэтому в начальном состоянии $J_z = J_1 + J_2$, а в конечном состоянии $J'_z = J'_1 + J'_2$. Следовательно: $(J_1 + J_2)\omega = (J'_1 + J'_2)\omega'$ (2), где значения моментов инерции J_1 и J_2 платформы и человека соответственно относятся к начальному состоянию системы; J'_1 и J'_2 – к конечному. Момент инерции платформы относительно оси z при переходе человека не изменяется: $J_1 = J'_1 = \frac{1}{2}m_1R^2$. Момент инерции человека относительно той же оси будет изменяться. Если рассматривать человека как материальную точку, то его момент инерции J_2 в начальном состоянии (в центре платформы) можно считать равным нулю. В конечном состоянии (на краю платформы) момент инерции человека $J_2' = m_2 R^2$. Подставим в формулу (2) выражения моментов инерции, начальной угловой скорости вращения платформы с человеком ($\omega = 2\pi n$) и конечной угловой скорости ($\omega' = \upsilon / R$, где υ – скорость человека относительно пола): $\left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + 0\right) 2\pi n = \left(\frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 R^2\right) \frac{\upsilon}{R}$. После сокращения на R^2 и простых преобразований находим скорость: $\upsilon = \frac{2\pi n R m_1}{(m_1 + 2m_2)} = 1$ м/с.

Ответ: $\upsilon = 1$м/с.

Пример 7

Ракета установлена на поверхности Земли для запуска в вертикальном направлении. При какой минимальной скорости v_1, сообщенной ракете при запуске, она удалится от поверхности на расстояние, равное радиусу Земли ($R = 6{,}37 \cdot 10^6$ м)? Всеми силами, кроме силы гравитационного взаимодействия ракеты и Земли, пренебречь.

Дано: $R = 6{,}37 \cdot 10^6$ м.

Найти: υ_1.

Решение. Со стороны Земли на ракету действует сила тяжести, являющаяся потенциальной силой. При неработающем двигателе под действием потенциальной силы механическая энергия ракеты изменяться не будет. Следовательно: $E_{K1} + E_{P1} = E_{K2} + E_{P2}$ (1), где E_{K1}, E_{K2}, E_{P1} и E_{P2} – кинетическая и потенциальная энергия ракеты после выключения двигателя в начальном (у поверхности Земли) и конечном (на расстоянии, равном радиусу Земли) состояниях. Согласно определению кинетической энергии $E_{K1} = \frac{1}{2} m \upsilon_1^2$. Потенциальная энергия ракеты в начальном состоянии (потенциальная энергия гравитационного взаимодействия тел, бесконечно удаленных друг от друга, принимается равной нулю): $E_{P1} = -\frac{GmM}{R}$. По мере удаления ракеты от поверхности Земли ее потенциальная энергия возрастает, а кинетическая убывает. В конечном состоянии кинетическая энергия E_{K2} станет равной нулю, а потенциальная – достигнет максимального значения: $E_{P2} = -\frac{GmM}{2R}$. Подставляя выражения E_{K1}, E_{K2}, E_{P1} и E_{P2} в (1), получаем $\frac{m\upsilon_1^2}{2} - \frac{GmM}{R} = -\frac{GmM}{2R}$, откуда $\upsilon_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$. Заметив, что $\frac{GM}{R^2} = g$ (g – ускорение свободного падения у поверхности Земли), перепишем эту формулу в виде $\upsilon_1 = \sqrt{gR}$, что совпадает с выражением для первой космической скорости. Произведем вычисления: $\upsilon_1 = 7{,}9$ км/с.

Ответ: $\upsilon_1 = 7{,}9$ км/с.

Пример 8

На двух шнурах одинаковой длины $l = 0{,}8$ м, подвешены два свинцовых шара массой 0,5 и 1 кг. Шары соприкасаются между собой. Шар меньшей массы отвели в сторону так, что шнур отклонился на угол $\alpha = 60^\circ$, и отпустили. На какую высоту поднимутся оба шара после столкновения? Удар считать центральным и неупругим. Найти энергию, израсходованную на деформацию шаров после удара.

Дано: $l = 0{,}8$ м, $m_1 = 0{,}5$ кг, $m_2 = 1$ кг, $\alpha = 60^\circ$.

Найти: h, $\Delta E_{деф}$.

Решение. Так как удар шаров неупругий, то после удара шары будут двигаться с общей скоростью v. Закон сохранения импульса при этом ударе имеет вид $m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = (m_1 + m_2)\upsilon$ (1), где υ_1 и υ_2 – скорости шаров до удара. Скорость большого шара до удара равна нулю. Скорость меньшего шара найдем, используя закон сохранения энергии. При отклонении меньшего шара на угол α ему сообщается потенциальная энергия, которая затем переходит в кинетическую: $m_1 g h_1 = m_1\upsilon_1^2/2$. Таким образом, $h_1 = l(1-\cos\alpha) = 2l\sin^2(\alpha/2)$, поэтому $\upsilon_1 = \sqrt{2gh_1} = 2\sqrt{gl}\sin(\alpha/2)$ (2). Из уравнений (1) и (2) находим скорость шаров после удара: $\upsilon = m_1\upsilon_1/(m_1 + m_2) = 2m_1\sqrt{gl}\frac{\sin(\alpha/2)}{m_1 + m_2}$ (3). Кинетическая энергия, которой обладают шары после удара, переходит в потенциальную энергию: $(m_1+m_2)\upsilon^2/2=(m_1+m_2)gh$ (4), где h – высота поднятия шаров после удара. Из формулы (4) находим высоту и с учетом (3), $h=2m_1^2 l\cdot\dfrac{\sin^2(\alpha/2)}{(m_1+m_2)^2}=0{,}044$ м. При неупругом ударе шаров часть энергии расходуется на деформацию. Энергия деформации определяется разностью кинетических энергий до и после удара: $\Delta E_{деф}=\dfrac{m_1\upsilon_1^2}{2}-\dfrac{(m_1+m_2)\upsilon^2}{2}$. Используя уравнения (2) и (3), получим $\Delta E_{деф}=2glm_1\left(1-\dfrac{m_1}{m_1+m_2}\right)\sin^2(\alpha/2)=1{,}3$ Дж.

Ответ: $h=0{,}044$ м, $\Delta E_{деф}=1{,}3$ Дж.

Пример 9

Точка совершает гармонические колебания **с** частотой $\nu=10$ Гц. В момент, принятый за начальный, точка имела максимальное смещение: $x_{\max}=1$ мм. Написать уравнение колебаний точки и начертить их график.

Дано: $\nu=10$ Гц, $x_{\max}=1$ мм.

Найти: уравнение колебаний.

Решение. Уравнение колебаний точки можно записать в виде $x=A\sin(\omega t+\varphi_1)$ (1), где A – амплитуда колебаний; ω – циклическая частота; t – время; φ_1 – начальная фаза. По определению амплитуда колебаний $A=x_{\max}$ (2). Циклическая

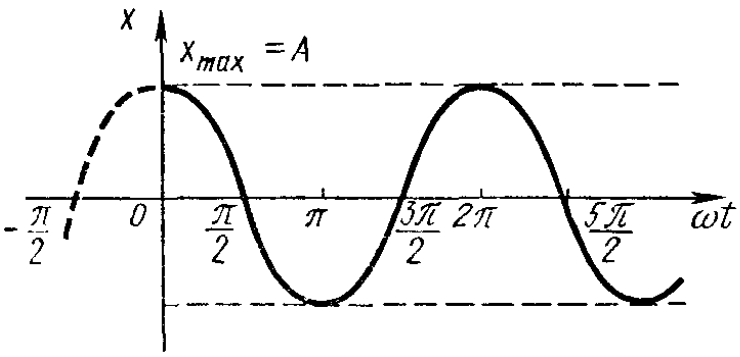

Рис. 3

частота ω связана с частотой ν, соотношением $\omega=2\pi\nu$ (3). Для момента времени $t=0$ формула (1) примет вид $x=A\sin\varphi_1$,

откуда начальная фаза $\varphi_1=\arcsin\left(x_{\max}/A\right)=\arcsin 1$, или

$\varphi_1 = (2k+1)\frac{\pi}{2}; (k = 0,1,2,...)$. Изменение фазы на 2π не изменяет состояния колеблющейся точки, поэтому можно принять $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}$. С учетом равенств (2) – (4) уравнение колебаний примет вид $x = A\sin(2\pi\nu t + \varphi_1)$, или $x = A\cos 2\pi\nu t$, где $A = 1$ мм = 10^{-3}м, $\nu = 10$ Гц, $\varphi = \frac{\pi}{2}$. График соответствующего гармонического колебания приведен на рис. 3.

Ответ: $x = 10^{-3}\cos 20\pi t$ м.

Пример 10

Частица массой m=0,01 кг совершает гармонические колебания с периодом $T = 2$ с. Полная энергия колеблющейся частицы E=0,1 мДж. Определить амплитуду колебаний и наибольшее значение силы, действующей на частицу.

Дано: m=0,01 кг, $T = 2$ с, E=0,1 мДж.

Найти: A, $F_{\max}$.

Решение. Для определения амплитуды колебаний воспользуемся выражением полной энергии частицы: $E = \frac{1}{2}m\omega^2A^2$, где $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Отсюда амплитуда $A = \frac{T}{2\pi}\sqrt{\frac{2E}{m}}$ (1). Так как частица совершает гармонические колебания, то сила, действующая на нее, является квазиупругой и, следовательно, может быть выражена соотношением $F = -kx$, где k – коэффициент квазиупругой силы; x – смещение колеблющейся точки. Максимальной сила будет при максимальном смещении $x_{\max}$, равном амплитуде: $F_{\max} = kA$ (2). Коэффициент k выразим через период колебаний: $k = m\omega^2 = \frac{m \cdot 4\pi^2}{T^2}$ (3). Подставив выражения (1) и (3) в (2) и произведя упрощения, получим $F_{\max} = \frac{2\pi\sqrt{2mE}}{T}$. Произведем вычисления: A=45 мм; F_{max}=4,44 мН.

Ответ: A=45 мм, F_{max}=4,44 мН.

Пример 11

Стержень длиной 1 м движется мимо наблюдателя со скоростью *0,8с* (*с* – скорость света). Какой кажется наблюдателю его длина?

Дано: $l_0 = 1$ *м,* $\upsilon = 0{,}8c$.

Найти: l.

Решение. Зависимость длины тела от скорости в релятивисткой механике выражается формулой $l = l_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$ (1), где l_0 – длина покоящегося стержня; υ – скорость его движения; c – скорость света в вакууме. Подставляя в формулу (1) числовые значения, получим $l = 0{,}6$ м.

Ответ: $l = 0{,}6$ м.

II. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Основные законы и формулы

Таблица 2

Величина или физический закон	**Формула**
1	2
Уравнение состояния идеального газа	$PV = \nu RT$, где $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$, ν – число молей газа, m – масса газа, M – молярная масса, N – число молекул в газе, N_A – число Авогадро, R – универсальная газовая постоянная
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории	$P = \frac{1}{3}nm_0V_{кв}^2 = \frac{2}{3}n\langle E\rangle = nkT$, где n –концентрация, m_0 – масса молекулы, k– постоянная Больцмана

Продолжение табл. 2

1	2
Средняя кинетическая энергия молекулы	$\langle E \rangle = \frac{i}{2}kT$, где i – число степеней свободы молекулы
Средняя квадратичная скорость молекул	$V_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$
Средняя арифметическая скорость молекул	$V_{ар} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$
Наиболее вероятная скорость молекул	$V_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$
Средняя длина свободного пробега молекулы	$< l >= \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d_{эфф}^2}$, где $d_{эфф}$ – эффективный диаметр частицы
Среднее число соударений молекулы за одну секунду	$< z >= \sqrt{2}n\pi d_{эфф}^2 \cdot V_{ар}$
Распределение молекул в поле силы тяжести (распределение Больцмана)	$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right)$
Барометрическая формула	$P = P_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right)$
Уравнение диффузии (закон Фика)	$dm = -D\frac{d\rho}{dx}Sdt$
Сила внутреннего трения в жидкости и газе	$F = -\eta\frac{dV}{dx}S$
Уравнение теплопроводности	$dQ = -\lambda\frac{dT}{dx}Sdt$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda = \frac{c_V \rho \langle V \rangle \langle l \rangle}{3}$
Коэффициент диффузии	$D = \frac{\langle V_{ар} \rangle \langle l \rangle}{3}$

Продолжение табл. 2

1	2
Коэффициент внутреннего трения	$\eta = \dfrac{\rho\langle V_{ap}\rangle\langle l\rangle}{3}$
Первое начало термодинамики	$\delta Q = dU + \delta A$
Внутренняя энергия идеального газа	$U = N < E_K >= N\dfrac{i}{2}kT = \dfrac{i}{2}\dfrac{N}{N_A}RT = \dfrac{i}{2}\nu RT$
Работа при изобарном процессе	$A = P(V_2 - V_1)$
Работа при изотермическом процессе	$A = \nu\ RT\ln\dfrac{V_2}{V_1}$
Работа при адиабатном процессе	$A = \dfrac{\nu RT_1}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right] = \nu C_V(T_1 - T_2)$
Уравнение адиабатного процесса	$PV^{\gamma} = const$, где $\gamma = \dfrac{C_P}{C_V}$ – показатель адиабаты
КПД цикла Карно	$\eta = \dfrac{A}{Q_1} = \dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1}$
Изменение энтропии	$dS = \dfrac{dQ}{T} = \dfrac{dU + dA}{T}$
Теплоемкость тела	$C = \dfrac{dQ}{dT}$
Удельная теплоемкость	$c_m = \dfrac{dQ}{mdT}$
Молярная теплоемкость	$C_M = \dfrac{dQ}{\nu dT}$
Молярная теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении	$C_V = \dfrac{i}{2}R$, $C_P = \dfrac{i+2}{2}R$

Окончание табл. 2

1	2
Уравнение Майера	$C_P - C_V = R$
Уравнение Ван-дер-Ваальса	$\left(P + \frac{m^2}{M^2}\frac{a}{V^2}\right)\left(V - \frac{m}{M}b\right) = \frac{m}{M}RT$

Примеры решения задач

Пример 1

Определить молярную массу M смеси кислорода массой $m_1 = 25$ г и азота массой $m_2 = 75$ г.

Дано: $m_1 = 25$ г, $m_2 = 75$ г.

Найти: M

Решение. Молярная масса смеси M есть отношение массы смеси m к количеству вещества смеси ν: $M = \frac{m}{\nu}$. Масса смеси равна сумме масс компонентов смеси: $m = m_1 + m_2$. Количество вещества смеси равно сумме количеств вещества компонентов: $\nu = \nu_1 + \nu_2 = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}$. Тогда для молярной массы получим: $M = \dfrac{m_1 + m_2}{\dfrac{m_1}{M_1} + \dfrac{m_2}{M_2}}$. Применив метод, использованный в предыдущем примере, найдем значение молярной массы кислорода M_1 и азота M_2: $M_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $M_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Подставим значения величин в формулу для молярной массы и произведем вычисления: $M = 28{,}9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Ответ: $M = 28{,}9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Пример 2

Найти среднюю длину свободного пробега молекул и число соударений за секунду, происходящих между всеми молекулами кислорода, находящегося в сосуде объемом 2 л при температуре 27 °С и давлении 100 кПа.

Дано: $V = 2 \cdot 10^{-3}\, м^3$, $T = 300K$, $P = 10^5\, Па$

Найти: $< l >$, Z

Решение. Средняя длина свободного пробега молекул кислорода вычисляется по формуле $< l >= \dfrac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$, где d – эффективный диаметр молекулы кислорода; n – число молекул в единице объема, которое можно найти из уравнения $n = p / kT$, где k – постоянная Больцмана. Тогда $< l >= \dfrac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$. Подставив численные значения в системе СИ, получим: $< l >= 3{,}6 \cdot 10^{-8}$ м. Число соударений Z, происходящих между всеми молекулами кислорода за одну секунду, равно $Z = \dfrac{1}{2} < Z > N$, где N – число молекул в данном сосуде, $< Z >$ – среднее число соударений одной молекулы за одну секунду. Число молекул в сосуде $N = n \cdot V$, а среднее число соударений $< Z >= \dfrac{< v >}{< l >}$, где $< v >$ – средняя арифметическая скорость молекулы, которую можно найти как $< v >= \sqrt{\dfrac{8RT}{\pi M}}$. В результате для числа соударений получаем: $Z = \dfrac{1}{2} \dfrac{\sqrt{\dfrac{8RT}{\pi M}} \cdot \sqrt{2}\pi d^2 p}{kT} \cdot \dfrac{p}{kT} \cdot V = \dfrac{2\pi d^2 p^2 V}{k^2 T^2} \sqrt{\dfrac{RT}{\pi M}}$. Подставив численные значения, получим: $Z = 9 \cdot 10^{28}$ с$^{-1}$.

Ответ: $< l >= 3{,}6 \cdot 10^{-8}$ м, $Z = 9 \cdot 10^{28}$ с$^{-1}$.

Пример 3

Вычислить удельную теплоемкость при постоянном объеме c_V и при постоянном давлении c_P неона и водорода.

Дано: $M_{Ne} = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $M_H = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Найти: c_V , c_P

Решение. Удельная теплоемкость идеальных газов выражаются формулами $c_V = \frac{i}{2}\frac{R}{M}$ (1) и $c_P = \frac{i+2}{2}\frac{R}{M}$ (2), где i – число степеней свободы молекулы газа; M – молярная масса. Для неона (одноатомный газ) $i = 3$ и $M = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Произведем вычисления: $c_V = 624$ Дж/кг·К; $c_P = 1040$ Дж/кг·К. Для водорода (двухатомный газ) $i = 5$ и $M = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Тогда $c_V = 10400$ Дж/кг·К; $c_P = 14600$ Дж/кг·К.

Ответ: неон: $c_V = 624$ Дж/кг·К; $c_P = 1040$ Дж/кг·К; водород: $c_V = 10400$ Дж/кг·К; $c_P = 14600$ Дж/кг·К.

Пример 4

Кислород массой $m = 2$ кг занимает объем $V_1 = 1$ м^3 и находится под давлением $p_1 = 0{,}2$ МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3$ м^3, а затем при постоянном объеме – до давления $p_3 = 0{,}5$ МПа. Найти изменение ΔU внутренней энергии газа, совершенную им работу A и теплоту Q, переданную газу. Построить график процесса.

Дано: $m = 2$ кг, $V_1 = 1$ м^3, $p_1 = 0{,}2$ МПа, $V_2 = 3$ м^3, $p_3 = 0{,}5$ МПа.

Найти: ΔU, A, Q.

Решение. Изменение внутренней энергии газа $\Delta U = c_V m \Delta T = \frac{i}{2}\frac{R}{M} m \Delta T$ (1), где i – число степеней свободы молекул газа (для двухатомных молекул кислорода $i = 5$); $\Delta T = T_3 - T_1$ – разность температур газа в конечном (третьем) и начальном состояниях. Начальную и конечную температуру газа найдем из уравнения Менделеева–Клапейрона

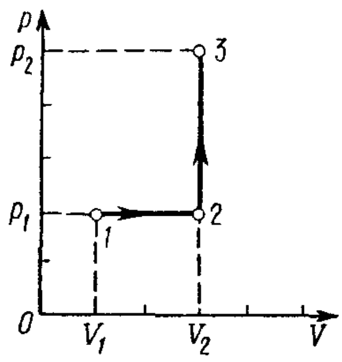

Рис. 4

$T = \dfrac{pVM}{mR}$. Работа расширения газа при постоянном давлении выражается формулой $A_1 = p\Delta V = \dfrac{m_1}{M} R\Delta T$. Работа газа, нагреваемого при постоянном объеме, равна нулю: $A_2 = 0$. Следовательно, полная работа, совершаемая газом $A = A_1 + A_2 = A_1$. Согласно первому началу термодинамики, теплота, переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии ΔU и работы A: $Q = \Delta U + A$. Произведем вычисления, учитывая, что для кислорода $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль: $T_1 = 385$ К; $T_2 = 1155$ К; $T_3 = 2887$ К; $A_1 = 0{,}4$ МДж; $A = A_1 = 0{,}4$ МДж; $\Delta U = 3{,}24$ МДж; $Q = 3{,}64$ МДж. График процесса приведен на рис. 4.

Ответ: $A = 0{,}4$ МДж; $\Delta U = 3{,}24$ МДж; $Q = 3{,}64$ МДж.

Пример 5

Определить изменение энтропии при изохорическом нагревании 2 г гелия от температуры $T_1 = 300$ К до $T_2 = 600$ К.

Дано: $m = 2 \cdot 10^{-3}$ кг, $T_1 = 300$ К, $T_2 = 600$ К.

Найти: ΔS

Решение. Изменение энтропии находим по формуле: $\Delta S = \int \dfrac{dQ}{T} = \int \dfrac{dA + dU}{T} = \int \dfrac{dU}{T}$. Здесь мы учли, что при изохорическом процессе работа не совершается: $dA = 0$. Элементарное изменение внутренней энергии находим по известной формуле $dU = \dfrac{i}{2} \dfrac{m}{M} RdT$. Тогда $\Delta S = \int \dfrac{i}{2} \dfrac{m}{M} \dfrac{RdT}{T} = \dfrac{i}{2} \dfrac{m}{M} R \int \dfrac{dT}{T}$. Проводя интегрирование с учетом начальной и конечной температур, получим: $\Delta S = \dfrac{i}{2} \dfrac{m}{M} R \ln\left(\dfrac{T_2}{T_1}\right) = \dfrac{i}{2} \dfrac{m}{M} R \ln 2$. Для гелия (одноатомная молекула) $i = 3$, тогда, производя вычисления, находим: $\Delta S = 4{,}3$ Дж/К.

Ответ: $\Delta S = 4{,}3$ Дж/К.

Пример 6

Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя $T_1 = 500$ К. Определить КПД цикла и температуру T_2 холодильника тепловой машины, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от нагревателя, машина совершает работу $A = 350$ Дж.

Дано: $T_1 = 500$ К, $A = 350$ Дж.

Найти: η , T_2

Решение. КПД тепловой машины показывает, какая доля теплоты, полученной от нагревателя, превращается в механическую работу. КПД выражается формулой $\eta = \dfrac{A}{Q_1}$, где Q_1 – теплота, полученная от нагревателя; A – работа, совершенная рабочим телом тепловой машины. Зная КПД цикла, можно по формуле $\eta = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1}$ определить температуру холодильника T_2: $T_2 = T_1(1-\eta)$. Произведем вычисления: $\eta = 0{,}35$; $T_2 = 325$ К.

Ответ: $\eta = 0{,}35$; $T_2 = 325$ К.

Пример 7

В цилиндре под поршнем находится водород массой $m = 0{,}02$ кг при температуре $T_1 = 300$ К. Водород сначала расширился адиабатно, увеличив свой объем в $n_1 = 5$ раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в $n_2 = 5$ раз. Найти температуру в конце адиабатного расширения и работу газа при этих процессах. Изобразить процесс графически.

Дано: $m = 0{,}02$ кг, $T_1 = 300$ К, $n_1 = 5$, $n_2 = 5$.

Найти: T_2, A_1, A_2

Решение. Температура и объем газа, совершающего адиабатный процесс, связаны между собой

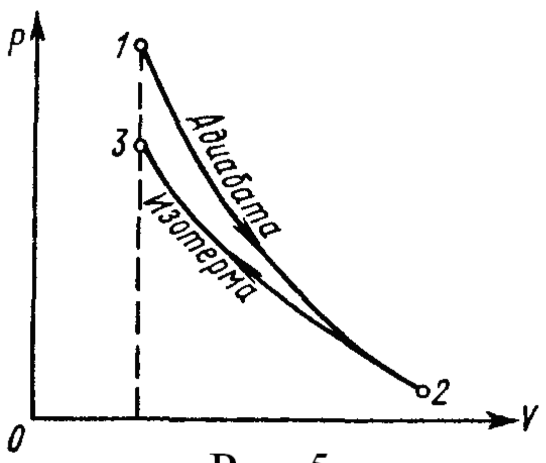

Рис. 5

соотношением $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$, или $\frac{T_2}{T_1}=\frac{1}{n_1^{\gamma-1}}$, где γ – отношение значений теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме; $n_1=\frac{V_2}{V_1}$. Отсюда получаем следующее выражение для конечной температуры $T_2=\frac{T_1}{n_1^{\gamma-1}}$. Работа A_1 газа при адиабатном расширении может быть определена по формуле $A_1=\frac{m}{M}c_V\left(T_1-T_2\right)=\frac{m}{M}\frac{i}{2}R\left(T_1-T_2\right)$, где c_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме. Работа A_2 газа при изотермическом процессе может быть выражена в виде $A_2=\frac{m}{M}RT_2\ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right)=\frac{m}{M}RT_2\ln\left(\frac{1}{n_2}\right)$, где $n_2=\frac{V_2}{V_3}$. Произведем вычисления, учитывая, что для водорода как двухатомного газа $\gamma=1{,}4$, $i=5$ и $M=2\cdot10^{-3}$ кг/моль; $T_2=157$ К; $A_1=29800$ Дж; $A_2=-21000$ Дж. Знак «минус» показывает, что при сжатии работа совершается над газом внешними силами. График процесса приведен на рис. 5.

Ответ: $T_2=157$ К; $A_1=29800$ Дж; $A_2=-21000$ Дж.

1. Контрольная работа №1

1. По заданному уравнению пройденного телом пути $S=4+2t+5t^2$ построить график зависимости скорости от времени за первые 3с. Определить расстояние, пройденное телом за это время.
2. Камень брошен с вышки в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с. Определить скорость, тангенциальное и нормальное ускорение камня в конце второй секунды после начала движения.

3. Наибольшая высота подъема тела, брошенного под углом к горизонту со скоростью 20 м/с, составляет 10 м. Под каким углом оно брошено?

4. С башни высотой 49 м в горизонтальном направлении брошено тяжелое тело со скоростью 5 м/с. Определить тангенциальное и нормальное ускорения тела в точке, соответствующей половине всего времени падения тела. Установить, на каком расстоянии от башни оно упало.

5. С отвесной скалы высотой 24,5 м бросают мяч в горизонтальном направлении с некоторой начальной скоростью. Мяч попадает в цель, находящуюся на земле, на расстоянии 30 м от основания скалы. С какой начальной скоростью он был брошен и какую конечную скорость он приобрел, попадая в цель?

6. Мяч, брошенный под углом 30° к горизонту с высоты 5 м, упал на землю. Определить конечную скорость мяча и дальность полета, если начальная его скорость 22 м/с.

7. Под каким углом к горизонту надо бросить тело со скоростью 20 м/с, чтобы дальность полета была в четыре раза больше наибольшей высоты подъема? Определить радиус кривизны траектории в верхней её точке.

8. Мяч падает на горизонтальную плоскость под углом 60° со скоростью 15 м/с, ударяется и отскакивает от неё с такой же скоростью. Определить дальность полета и радиус кривизны траектории мяча в наивысшей точке полета.

9. Точка движется согласно уравнению x=5+3t, y=2+7t. Какова скорость движения точки?

10. Движение точки описывается уравнением $S = 4t^4 + 2t^2 + 7$. Найти скорость и ускорение точек в момент времени $t = 2\ c$ и среднюю скорость за первые 2 с движения?

11. Какой угол составляет вектор полного ускорения точки, лежавшей на ободе маховика, с радиусом маховики через 1,5 с после начала движения? Угловое ускорение маховика – 0,77c^{-2}.

12. Точка движется по окружности радиусом 60 см с тангенциальным ускорением 10 м/c^2. Чему равно нормальное и полное ускорение в конце третьей секунды после начала движения? Чему равен угол между векторами полного и нормального ускорений в этот момент?

13. Уравнение вращения твердого тела $\varphi = 4t^3 + 3t$. Определить угловую скорость, угловое ускорение через 2 с после начала вращения.

14. По дуге окружности радиусом 10 м движется точка. В некоторый момент времени нормальное ускорение точки равно 4,9 м/c^2, в этот момент векторы полного и нормального ускорения образуют угол 60°. Найти скорость и тангенциальное ускорение точки.

15. На одном валу насажены два колеса с диаметрами 16 и 4 см, вращающиеся с постоянным угловым ускорением 4 c^{-2}. Определить линейные скорости на ободах колес и угловую скорость вращения в конце второй секунды после начала движения.

16. К маховику, вращающемуся с частотой 360 $мин^{-1}$, прижали тормозную колодку. С этого момента он стал вращаться равнозамедленно с ускорением 20 c^{-2}. Сколько потребуется времени для его остановки? Через сколько оборотов он остановится?

17. Материальная точка движется по окружности диаметром 40 м. Зависимость пути от времени движения точки определяется уравнением $S = t^3 + 4t^2 - t + 8$. Определить пройденный путь, скорость, тангенциальное и полное ускорение движущейся точки через 4 с после начала движения.

18. Уравнение вращения твердого тела $\varphi = 3t^2 + t$. Определить число оборотов тела, угловую скорость, угловое ускорение через 10 с после начала вращения.

19. По окружности радиусом 20 см движется материальная точка. Уравнение её движения: $S = 2t^2 + t$. Чему равно тангенциальное, нормальное и полное ускорение точки в момент времени, равный 10 с?

20. Тело вращается равноускоренно с начальной угловой скоростью 5 c^{-1} и угловым ускорением 1 c^{-2}. Сколько оборотов сделает тело за 10 с?

21. Используя условие задачи 23, вычислить, с какой скоростью и в каком направлении будет двигаться мишень после попадания снаряда, если мишень двигалась навстречу снаряду со скоростью 72 км/ч.

22. Снаряд, летевший с горизонтальной скоростью 600 м/с, разрывается на два осколка. Масса одного осколка в два раза больше другого. Осколок большей массы падает по вертикали, а меньший – под углом 30° к горизонту. Какова скорость этого второго осколка?

23. Снаряд массой 20 кг летит с начальной скоростью 200 м/с под углом 60° к горизонту. В наивысшей точке подъема он встретил цель и полностью погасил скорость в течение 0,02 с. Определить среднюю силу удара. Сопротивление воздуха не учитывать.

24. Стальной шарик массой 10 г упал с высоты 1 м на стальную плиту и подскочил после удара на 0,8 м. Определить изменение количества движения шарика.

25. Ракета массой 250 г содержит в себе 50 г взрывчатого вещества. На какую высоту она может подняться, если предположить, что взрывчатое вещество взрывается все сразу, а образовавшиеся пороховые газы имеют скорость 300 м/с. Определить потенциальную энергию ракеты в высшей точке подъема. Сопротивлением воздуха пренебречь.

26. Две гири массой 1,9 и 0,9 кг соединены нерастяжимой гибкой нитью, перекинутой через неподвижный блок, вращающийся без трения. С каким ускорением будут двигаться грузы? Чему равна сила натяжения нити?

27. Блок весом 2 Н подвешен к динамометру. Через блок перекинута нить с грузами массой 2 и 4 кг. Какую силу покажет динамометр во время движения грузов?

28. Мяч массой 250 г, движущийся со скоростью 50 м/с, упруго ударяется о вертикальную стенку и отскакивает. Стенка получает импульс 2,2 кг·м/с. Определить угол падения и силу удара мяча при продолжительности удара 0,02 с.

29. Молекула, подлетевшая к стенке под углом 60°, упруго ударяется о нее со скоростью 400 м/с и отлетает. Определить импульс силы, полученный стенкой. Масса молекулы – $3 \cdot 10^{-23}$ $г$.

30. Снаряд массой 2 кг, летящий со скоростью 300 м/с, попадает в мишень с песком массой 100 кг и застревает в ней. С какой скоростью и в каком направлении будет двигаться мишень после падения снаряда в случаях: 1) мишень неподвижная; 2) мишень двигалась в одном направлении со снарядом со скоростью 72 км/ч.

31. Тело массой 2 кг, движущееся со скоростью 10 м/с, сталкивается с неподвижным телом массой 3 кг. Считая удар центральным и неупругим, найти количество теплоты, выделившейся при ударе.

32. Тело двигалось со скоростью 3 м/с. Затем в течение 5 с на него действовала сила в 4 Н. За это время кинетическая энергия увеличилась на 100 Дж. Найти скорость тела в конце действия силы и его массу.

33. Поезд поднимается в гору с постоянной скоростью 36 км/ч. Уклон горы – 1 м на 1000 м пути. Коэффициент трения – 0,002. Определить, с какой скоростью будет двигаться поезд по горизонтальному пути при той же мощности двигателя?

34. Молот массой 600 кг, падая с высоты 3 м, забивает стержень в деталь. Найти среднюю силу сопротивления, если при каждом ударе стержень входит в деталь на глубину 6 см. Удар считать абсолютно неупругим.

35. На горизонтальную плиту упал шарик массой 200 г и отскочил от неё вертикально вверх. Плита при этом получила количество движения 4 кг·м/с. Считая, что масса плиты намного больше массы шарика и удар абсолютно упругий, найти, с какой высоты упал шарик.

36. Стальной шарик массой 20 г, упав с высоты 1 м на плиту, передал ей импульс силы, равный 0,17 Н·с. Найти высоту, на которую после удара поднялся шарик, и количество теплоты, выделившееся при ударе.

37. Определить работу, которую необходимо затратить, чтобы вывести ракету за пределы поля тяготения Земли, если ракета стартует с космического корабля, движущегося по круговой орбите на уровне 500 км над поверхностью Земли. Масса ракеты – 200 кг.

38. Со скалы высотой 19,6 м в горизонтальном направлении бросили камень со скоростью 36 км/ч. Определить кинетическую и потенциальную энергию камня через 1,25 с после начала движения. Масса камня – 100 г. Сопротивлением воздуха пренебречь.

39. Под углом 40° к горизонту был брошен мяч массой 150 г со скоростью 72 км/ч. Найти его кинетическую и потенциальную энергию через 2 с после начала полета, а также в высшей точке траектории. Сопротивлением воздуха пренебречь.

40. Два шара массой 4 и 6 кг движутся вдоль одной прямой навстречу друг другу со скоростью 5 и 3 м/с. Какова скорость шаров после столкновения, если удар: 1) неупругий; 2) упругий? Определить кинетическую энергию первого шара после удара во втором случае.

41. Маховик, масса которого 6 кг равномерно распределена по ободу радиусом 18 см, вращается на валу с частотой 600 мин^{-1}. Под действием тормозящего момента 10 Н·м маховик останавливается. Найти, через какой промежуток времени он остановится, какое число оборотов он совершил за это время и какова работа торможения.

42. Стержень длиной 1 м и массой 1 кг может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец. В другой конец стержня попадает летящая горизонтально пуля массой 5 г и застревает в нём. Найти первоначальную кинетическую энергию пули, если стержень отклонился на 30°.

43. Стержень длиной 1 м и массой 7 кг может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец. В другой конец стержня попадает пуля массой 5 г, летящая со скоростью 500 м/с перпендикулярно оси и стержню, и застревает в нём. Определить угловую скорость стержня после попадания в него пули.

44. В горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси вращается тонкий стержень длиной 0,5 м и массой 1 кг. Симметрично оси вращения, проходящей через середину стержня, на расстоянии 10 см от неё на стержне расположены два небольших груза массой по 0,2 кг. Угловая скорость вращения – 2 с^{-1}. Чему будет равна угловая скорость, если грузы сдвинутся на концы стержня?

45. По наклонной плоскости вверх катится без скольжения полый обруч. Ему сообщена начальная скорость 3,14 м/с, параллельная наклонной плоскости. Установить, какой путь пройдет обруч, если угол наклона плоскости 30°.

46. Шар в одном случае соскальзывает без вращения, в другом – скатывается с наклонной плоскости с высоты 2 м. Определить скорость в конце спуска в двух случаях. Трением пренебречь.

47. Человек стоит в центре скамьи Жуковского и держит на вытянутых руках гири массой по 5 кг. Расстояние между гирями

– 1,3 м. При симметричном сжатии рук расстояние от гири до оси вращения уменьшилось до 15 см, скорость вращения скамьи изменилась. Момент инерции гирь и скамьи с человеком на ней при вытянутых руках – 10 кг·$м^2$. Определить, как изменилась скорость вращения скамьи, если известно, что при первом положении гирь скамья вращалась с частотой 120 мин$^{-1}$. Какую работу произведет человек при изменении положения гирь?

48. Цилиндр массой 5 кг катится без скольжения с постоянной скоростью 14 м/с. Определить: 1) кинетическую энергию цилиндра; 2) через какое время цилиндр остановился, если сила трения равна 50 Н.

49. Однородный стержень длиной 1,2 м и массой 0,3 кг вращается в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через один из концов стержня. Чему равен вращающий момент, если стержень вращается с угловым ускорением 9,81 $с^{-2}$? Как изменится вращающий момент, если ось вращения поместить в центр масс стержня?

50. Момент силы, действующей на тело, 9,8 Н·м. Через 10 с после начала вращения тело достигло угловой скорости 4 $с^{-1}$. Найти момент инерции тела.

51. С какой скоростью движется Земля вокруг Солнца? Принять, что Земля движется по круговой орбите.

52. Во сколько раз скорость движения Венеры больше скорости движения Марса вокруг Солнца? Расстояние от Солнца до Венеры – 108 млн. км, а до Марса – 227,8 млн. км.

53. Период вращения искусственного спутника Земли равен 2 ч. Считая орбиту спутника круговой, найти, на какой высоте над поверхностью Земли движется спутник.

54. Найти линейную скорость и период вращения космического корабля, движущегося вокруг Луны по круговой орбите на высоте 500 км.

55. Искусственный спутник Земли движется по круговой орбите на высоте 300 км относительно поверхности Земли. Найти центростремительное ускорение, с которым спутник движется по орбите.

56. Прямоугольный брусок со сторонами 3,3 м и 6,9 м движется параллельно большому ребру. При какой скорости

движения прямоугольный брусок превратится в куб? Как скажется быстрое движение на объёме тела?

57. Электрон летит со скоростью v = 0,8 с, где с = $3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Определить кинетическую энергию электрона. Во сколько раз его релятивистская масса больше массы покоя? Масса покоя электрона равна $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

58. Определить погрешность, которая может возникнуть, если кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью 0,75 скорости света, подсчитать не по релятивистской формуле, а по классической.

59. Масса покоя первой частицы в два раза больше массы покоя второй частицы, а их скорости соответственно равны 0,85 и 0,95 скорости света. Найти отношение их кинетических энергий.

60. Найти импульс, полную и кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью, равной 0,7 скорости света. Масса покоя электрона равна $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

61. Начальная фаза колебаний точки – 15°. Через какое время от начала движения смещение точки первый раз достигнет величины, равной половине амплитуды. Период колебаний равен 12 с.

62. Однородный диск радиусом 0,4 м колеблется в вертикальной плоскости около горизонтальной оси. Ось перпендикулярна диску и проходит через его край. Как изменится период колебаний диска, если ось перенести к центру параллельно ей самой на расстояние ¼ радиуса от прежнего положения?

63. Период колебаний математического маятника – 10 с. Длина этого маятника равна суммарной длине других математических маятников, один из которых имеет частоту колебаний 1/6 Гц. Чему равен период колебаний второго из этих маятников?

64. Уравнение движения материальной точки массой 5 г имеет вид $s = 2\sin(\pi t/6 + \pi/8)$ см. Определить максимальную возвращающую силу и полную энергию колебаний.

65. Невесомый стержень длиной 60 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец. На стержне закреплены два груза одинаковой массы. Определить период колебаний, если один груз закреплен на нижнем конце стержня, а другой – на 10 см выше. Как изменится период

колебаний стержня, если один груз оставить на конце стержня, а другой расположить на 10 см ниже оси вращения? Масса груза – 300 г.

66. Найти массу груза, который на пружине жесткостью 250 Н/м делает 20 колебаний за 16 с. Найти полную энергию колебаний груза и его наибольшую скорость, если амплитуда колебаний равна 2 см.

67. На каком расстоянии от источника колебаний находится колеблющаяся точка, если смещение точки от положения равновесия равно половине амплитуды для момента t = T/3? Длина волны равна 4 м.

68. Для какого первого момента времени смещение точки от положения равновесия равно $\sqrt{2}/2$ её амплитуды? Расстояние колеблющейся точки от источника – 3/8λ, а период колебаний – 2 с.

69. Чему равна разность фаз колебаний двух точек, если они удалены друг от друга на расстояние 3 м и лежат на прямой, перпендикулярной фронту волны, а период колебаний – 0,02 с. Скорость распространения волны – 600 м/с.

70. Сколько полных колебаний должен сделать маятник, логарифмический декремент затухания которого – 0,054, для того чтобы амплитуда его колебаний уменьшилась в три раза?

71. В смеси газов содержится 30 % кислорода и 70 % гелия. Определить плотность газа при температуре 300 К и давлении 0,01 МПа.

72. В воздухе содержится 23,6 % кислорода и 76,4 % азота (по массе) при давлении 100 кПа и температуре 13°С. Определить плотность воздуха и парциальное давление кислорода.

73. Открытый сосуд при атмосферном давлении медленно нагревают от 250 до 350 К. Какая часть массы воздуха осталась в нем? Расширением сосуда пренебречь.

74. В вертикальном цилиндре под тяжелым поршнем находится воздух при температуре 250 К и давлении 1 МПа. Определить площадь сечения поршня, если его масса – 100 кг, а объем сжатого воздуха – 0,5 л.

75. В сосуде емкостью 50 л находится азот при температуре 17°С. Вследствие утечки газа давление уменьшилось на 80 кПа.

Определить массу газа, вышедшего из баллона. Температуру считать неизменной.

76. Определить массу газа в баллоне емкостью 90 л при температуре 295 К и давлении $5 \cdot 10^5$ Па, если его плотность при нормальных условиях – 1,3 кг/м^3.

77. Автомобильная камера машины емкостью 6 л содержит 26 г воздуха при температуре 27°С. После подкачки воздуха давление увеличилось на 20%, а температура повысилась на 5°С. Какую массу воздуха дополнительно ввели в камеру?

78. Сколько молекул кислорода находится в сосуде объемом 33,8 м^3 при температуре 27°С и давлении 1,2 МПа. Найти суммарную энергию теплового движения всех молекул газа.

79. Смесь 40 г водорода и 80 г неона в сосуде ёмкостью 0,8 м^3 при давлении 0,5 МПа. Определить температуру газа.

80. В обеих частях закрытого горизонтального цилиндра, разделенного на две части теплонепроницаемым легкоподвижным поршнем, находятся одинаковые массы газа при температуре 300 и 450 К соответственно. На какие части поршень делит цилиндр?

81. Вертикально поставленный цилиндр заполнен воздухом при давлении 0,1 МПа и закрыт легкоподвижным поршнем, масса которого – 50 кг и площадь поперечного сечения – 49 см^2. При температуре 27°С поршень устанавливается на некоторой высоте от дна цилиндра. Как изменится положение поршня, если на него положить дополнительный груз массой 50 кг, а температуру повысить на 150 К?

82. Какова длина ребра куба, содержащего $2 \cdot 10^6$ молекул идеального газа при нормальных условиях?

83. Вычислить энергию теплового движения 40 г кислорода при 147°С. Какую часть этой энергии составляет энергия поступательного движения молекул?

84. Вычислить температуру кислорода, при которой энергия теплового движения молекул не будет достаточна для того, чтобы молекулы преодолели силу земного притяжения и навсегда покинули планету.

85. Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа, заключенного в сосуд вместимостью 2 л под давлением 200 кПа. Масса газа – 0,3 г. Вычислить кинетическую энергию поступательного движения молекул газа.

86. Каково давление азота, если средняя квадратичная скорость его молекул – 500 м/с, а его плотность – 1,35 кг/м^3? Найти энергию поступательного и вращательного движения одной молекулы газа.

87. Два одинаковых сосуда, содержащие одинаковое число атомов гелия, соединены краном. В первом сосуде средняя квадратичная скорость атомов газа равна 100 м/с, во втором – 2000 м/с. Какой будет скорость, если кран открыть и сделать сосуды сообщающимися?

88. Найти число молекул в 1 м^3 и среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы газа, находящегося под давлением 0,2 МПа и температуре 127°С.

89. Если молекулы, содержащиеся в 1 г воды, равномерно распределить по поверхности Земли (земного шара), то сколько их придется на 1 см^2? Считать Землю идеальной сферой радиусом 6400 км.

90. В баллоне имеется 16 кг кислорода. Через отверстие в каждую секунду вытекает 1 млрд. молекул. За какое время газ вытечет из баллона?

91. Вычислить среднюю длину и среднюю продолжительность свободного пробега молекул кислорода при температуре 300 К и давлении 10,2 Па.

92. При каком давлении длина свободного пробега молекул водорода, находящегося при температуре 127°С, равна 0,1 мм, если при нормальных условиях она составляет $1{,}6 \cdot 10^{-7}$ м?

93. Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами заполнено газом. Радиус внешнего цилиндра – 20,5 см, внутреннего – 20 см. Длина обоих цилиндров равна 30 см. Внешний цилиндр вращается вокруг неподвижного внутреннего цилиндра с частотой 25 с$^{-1}$. Какая сила будет действовать на 1 м^2 поверхности внутреннего цилиндра, если вязкость газа – 18 мкПа? С достаточной степенью точности слой газа между цилиндрами можно рассматривать как плоский.

94. Какое количество теплоты теряется каждый час через кирпичную стену площадью 15 м^2 и толщиной 40 см из комнаты, если температура наружного пространства – 260 К, а температура помещения – 293 К? Теплопроводность кирпича – 0,4 Вт/(м·К).

95. Определить коэффициент теплопроводности кислорода при давлении 0,11 МПа и температуре 320 К, если коэффициент диффузии в этих условиях равен 0,2 см^2/с.

96. Стальной цилиндрический стержень длиной 15 см и диаметром 1 см прогревается с одного конца до температуры 650 К, а другим концом все время касается льда при температуре 273 К. Предполагая, что теплопередача идет исключительно вдоль стержня (без потерь через стенки), подсчитать массу льда, растаявшего за 1,5 мин. Теплопроводность стали – 49 Вт/(м·К).

97. Алюминиевый кофейник нагревается на электроплите. Вода в нем доведена до кипения (100°С) и в каждую минуту выделяется 17,5 г пара. Толщина дна кофейника – 0,2 см, а площадь дна – 400 см^2. Определить температуру наружной поверхности дна, предполагая, что все дно нагревается равномерно и вся теплота идет исключительно на испарение воды. Теплопроводность алюминия – 200 Вт/(м·К).

98. Внутри сферы диаметром 20 см находится кислород при температуре 17°С. Определить давление газа и число молекул в 1 см^3, если длина свободного пробега молекул равна диаметру сосуда (молекулы не испытывают соударений между собой).

99. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул азота равна средней арифметической скорости молекул водорода, находящихся при температуре 400К?

100. Взвешенные в воздухе пылинки можно рассматривать как крупные молекулы. Какова средняя арифметическая скорость пылинки, если ее масса – 10^{-14} кг? Температура воздуха – 300 К.

101. Кислород занимает объем 5 л при давлении 0,2 МПа, а при давлении 1 МПа та же масса газа занимает объем 2 л. Определить количество теплоты, сообщенное газу в процессе перехода из первого состояния во второе, изменение внутренней энергии и совершенную газом работу, если процесс происходил: 1) сначала изохорно, затем изобарно; 2)сначала изобарно, затем изохорно. Объясните совпадение и различие ответов.

102. Сосуд с газом при температуре 283 К движется со скоростью 250 м/с. Определить температуру азота в сосуде, если он внезапно остановится. Передачей теплоты стенкам пренебречь.

103. Углекислый газ, находящийся при температуре 450 К и давлении 0,5 МПа, расширяется адиабатно так, что его объем

увеличивается втрое. Найти температуру и давление газа после расширения.

104. Одна и та же масса двухатомного идеального газа сжимается один раз изотермически, а второй раз адиабатно. Начальные параметры газа в обоих случаях одинаковы. Найти отношение работы сжатия при адиабатном процессе к работе при изотермическом процессе, если в обоих процессах объем уменьшился в три раза.

105. Найти увеличение внутренней энергии и работу расширения 30 г водорода при постоянном давлении, если его объем увеличится в пять раз. Начальная температура 270 К.

106. Газ занимает объем 12 л при давлении 0,2 МПа. Определить работу, совершенную газом, если он изобарно нагревается от 300 до 348 К.

107. Определить молярную массу газа, если при изохорном нагревании на 10°С 20 г газа требуется 630 Дж теплоты, а при изобарном – 1050 Дж.

108. Горючую смесь газов помещают в цилиндр с поршнем. При быстром сжатии она воспламеняется при температуре 1200 К. Во сколько раз уменьшился объем смеси, если начальная ее температура была 300 К. Процесс считать адиабатным и γ=1,5.

109. В баллоне емкостью 5 л находится азот при 300 К под давлением 16,8 МПа. Баллон нагревают и при давлении 26,8 МПа он разрывается, давление газа при этом уменьшается до 0,1 МПа. Предполагая, что процесс расширения газа после взрыва адиабатный, определить: 1) объем газ после взрыва; 2) его температуру; 3) изменение внутренней энергии.

110. Определить отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме, если при изобарном нагревании его на 100 К требуется 4200 Дж теплоты, а при изохорном охлаждении газ отдает 5040 Дж теплоты при уменьшении давления в два раза. Начальная температура газа при изохорном охлаждении 400 К.

111. В 50 г воды при 90°С влили 30 г воды при 5°С. Определить изменение энтропии воды.

112. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изобарном расширении от 3 до 8 л.

113. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изохорном нагревании от 250 до 300 К.

114. Смешивают два разнородных инертных газа объемами 3 и 8 л, имеющих одинаковую температуру 400 К и давлении 100 кПа. Найти происходящее при этом изменение энтропии.

115. В 300 г воды при 50°С опустили 50 г льда при 0°С. Вычислить изменение энтропии в момент установления теплового равновесия.

116. Вычислить изменение энтропии при превращении 150 г воды, взятой при 20°С, в пар при 100°С.

117. При изохорном нагревании 480 г кислорода давление увеличилось в 5 раз. Найти изменение энтропии в этом процессе.

118. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изотермическом расширении от 3 до 8 л.

119. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изобарном охлаждении от 300 до 250 К.

120. Газ сначала был нагрет изобарно так, что его объем увеличился в 4 раза, затем изохорно охлажден так, что давление уменьшилось в 4 раза. Определить изменение энтропии для одного киломоля газа.

121. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, используется для поддержания в резервуаре температуры 250 К при температуре окружающего воздуха 27°С. За один цикл от резервуара отводится 3,15 кДж теплоты. Какая механическая работа требуется для выполнения одного цикла машины?

122. Идеальная холодильная машина работает по обратимому циклу Карно с КПД 40% и за один цикл совершает работу 25 кДж. Какое количество теплоты машины берет от холодильника за один цикл?

123. Определить термический КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, если температура нагревателя 100°С, а холодильника 0°С. На сколько нужно повысить температуру нагревателя, чтобы увеличить КПД машины в 3 раза (при неизменной температуре холодильника)?

124. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, предает холодильнику 288 МДж теплоты в час. Температура нагревателя 377°С, а холодильника 27°С. Определить мощность установки.

125. Идеальный двухатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изотерм и двух изохор, причем наибольшая температура

газа 500 К, а наименьшая 300 К, наибольший объем 12 л, а наименьший 3 л. Найти КПД цикла.

126. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя 600 К, а холодильника 300 К. Отношение наибольшего объема к наименьшему в одном процессе равно 8. Какую работу совершает машина за один цикл? Рабочим телом являются два моля одноатомного идеального газа.

127. Тепловая машина совершает термодинамический цикл, изображенный на рис.6 в координатах T, S (температура, энтропия). Вычислить КПД цикла, если максимальная температура рабочего тела 500 К, а минимальная 300 К.

128. Тепловая машина совершает термодинамический цикл, изображенный на рис. 7 в координатах T, S (температура, энтропия). Вычислить КПД цикла, если максимальная температура рабочего тела 500 К, а минимальная 300 К.

129. Идеальная тепловая машина совершает обратимый цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. В процессе цикла максимальное давление и объем газа в два раза больше минимального. Определить КПД цикла.

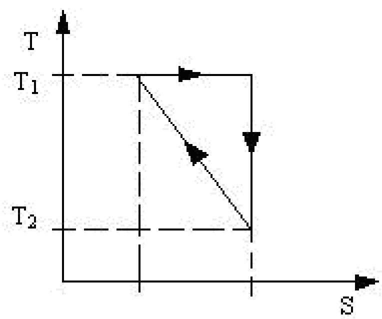

Рис. 6

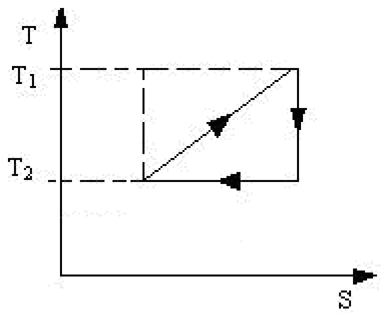

Рис. 7

130. Тепловая машина с двумя молями двухатомного газа совершает цикл, состоящий из изохоры, изотермы и изобары. Максимальный объем газа в 3 раза больше минимального, изотермический процесс протекает при температуре 450 К. Найти КПД цикла и работу, совершаемую за один цикл.

131. Найти удельные теплоемкости c_p и c_v для молекул газов, если вероятная скорость движения их при нормальных условиях равна 484,5 м/с, а скорость распространения звука 388 м/с.

132. Скорость звука в газе при нормальных условиях равна 340 м/с, а постоянная адиабаты равна 1,4. Какова плотность газа?

133. Скорость звука в кислороде при некоторой температуре 640 м/с. Определить скорость звука в гелии при той же температуре газа.

134. Определить удельные теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме водорода, в котором половина молекул распалась на атомы.

135. Вычислить температуру воздуха, при которой давление равно 11,8 МПа и плотность воздуха 145 кг/м^3. Постоянная Ван-дер-Ваальса для воздуха $\alpha=13{,}8\cdot10^{-2}$ Н·м^4/моль^2, $b=0{,}3\cdot10^{-4}$ м^3/моль. Сравнить результаты с вычислением в предположении, что газ идеальный.

136. Определить давление, которое создает 1 моль кислорода, если он занимает объем 0,5 л при температуре 300 К. Постоянная Ван-дер-Ваальса для кислорода $\alpha=13{,}6\cdot10^{-2}$ Н·м^4/моль^2 , $b=3{,}17\cdot10^{-5}$ м^3/моль. Сравнить результаты с давлением, вычисленным по уравнению Менделеева-Клайперона.

137. В сосуде вместимостью 0,3 л находится углекислый газ в количестве одного моля при температуре 300 К. Определить давление газа: 1) по уравнению Менделеева-Клапейрона; 2) по уравнению Ван-дер-Ваальса. Постоянная Ван-дер-Ваальса для углекислого газа $\alpha=3{,}61\cdot10^{-2}$ Н·м^4/моль^2, $b=4{,}28\cdot10^{-3}$ м^3/моль. Определить относительную погрешность, которая будет допущена, если газ считать идеальным.

138. Найти отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме для газовой смеси, состоящей из 7 г гелия и 14 г водорода.

139. Вычислить удельные теплоемкости газа, зная, что его молярная масса $4\cdot10^{-3}$ кг/моль и отношение молярной теплоемкости при постоянном давлении к молярной теплоемкости при постоянном объеме равно 1,67.

140. Трехатомный газ под давлением 240 кПа и температуре 20°С занимает объем 5 л. Определить молярную теплоемкость этого газа при постоянном давлении.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Физические постоянные	Обозначение	Числовые значения
Ускорение свободного падения	g	9,8 м/с^2
Гравитационная постоянная	G	6,67·10^{-11} м^3/(кг·с^2)
Постоянная Авогадро	N_A	6,02·10^{23} моль$^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	k	1,38·10^{-23} Дж/К
Мольный объем идеального газа (объем одного киломоля идеального газа при нормальных условиях)	V_o	22,4·10^{-3} м^3/мол

2. Астрономические величины

Средний радиус Земли …………… 6,37·10^6 м

Средняя плотность Земли ………… 5500 кг/м^3

Масса Земли ……………………… 5,96·10^{24} кг

Радиус Солнца …………………….. 6,95·10^8 кг

Средняя плотность Солнца ………... 1400 кг/м

Масса Солнца ………………………1,97·10^{30} кг

Радиус Луны ……………………….. 1,74·10^6 м

Масса Луны ………………………… 7,3·10^{22} кг

Среднее расстояние между центрами Земли и Луны – 3,84·10^8 м

Среднее расстояние между центрами Солнца и Земли – 5·10^{11} м

Период обращения Луны вокруг Земли – 27 сут 7 ч 43 мин

3. Плотность жидкостей ρ·10^{-3} , кг/м^3:

воды (при 4°С) – 1; глицерина – 1,26; керосина – 0,8;

масла – 0,9; ртути -13,6; спирта – 0,8

4. Плотность газов при нормальных условиях, кг/м^3:

азота – 1,25; аргона – 1,78; водорода – 0,09;

воздуха – 1,29; гелия – 0,18; кислорода – 1,43

5. Поверхностное натяжение жидкостей при 20°С, Н/м:

воды – 0,072; глицерина – 0,066; спирта – 0,022

6. Плотность ρ, модуль упругости (модуль Юнга) E, коэффициент линейного расширения (среднее значение) α

Наименование	$\rho\cdot10^{-3}$, кг/м^3	$E\cdot10^{-10}$ н/м^2	$\alpha\cdot10^{6}$ К$^{-1}$
Алюминий	2,7	7,00	24
Вольфрам	9,75	41,1	4,3
Железо (сталь)	7,85	22,0	11,9
Константан	8,9	21,0	17,0
Лед	0,92	0,28	
Медь	8,8	12,98	16,7
Никель	8,8	20,4	13,4
Нихром	8,4		
Фарфор	2,3		3

7. Эффективный диаметр молекул газов, $\sigma\cdot10^{10}$ м:

азота –3,1; аргона – 3,6; водорода – 2,3;
воздуха – 3,0; гелия – 1,9; кислорода – 2,9

8. Удельная теплота плавления, $\lambda\cdot10^{-4}$ Дж/кг:

льда – 33,5; свинца – 2,3

9. Удельная теплота парообразования, $r\cdot10^{-5}$ Дж/кг:

воды – 22,5; эфира – 6,68

10. Удельная теплоёмкость, $c\cdot10^{-2}$ Дж/(кг·К):

воды – 41,9; льда – 21,0; свинца – 1,26; нихрома – 22,0

Библиографический список

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. В 3-х тт. Т.1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны: учебное пособие.— Санкт-Петербург: Лань, 2007. — 352 с.

2. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика: учебное пособие. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 436 с.

3. Трофимова Т.И. Основы физики. Молекулярная физика. Термодинамика. учебное пособие. – М.: Кнорус, 2016 г. – 272 с.

4. Трофимова Т.И., Фирсов А.В. Курс физики. Задачи и решения. – М.: Академия, 2011. – 592 с.

Содержание

Учебное издание

Яшкевич Екатерина Александровна
Ашкалунин Александр Леонидович

ФИЗИКА

ЧАСТЬ 1
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Программа, методические указания и контрольные задания для студентов Института безотрывных форм обучения

Редактор и корректор В.А.Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова Темплан 2019 г., поз.73

Подп. к печати 25.01.2019. Бумага тип № 1.
Печать офсетная. Объем 3,0 печ.л.; 3,0 уч.-изд. л. Тираж 300 экз.
Изд. № 73. Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, СПб., ул. И.Черных, 4.