

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»

ФИЗИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов всех специальностей и направлений
подготовки очной и заочной форм обучения*

**МЕХАНИКА. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ**



Могилев 2023

УДК 535
ББК 22.33
Ф55

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физика» «17» января 2023 г., протокол № 5

Составители: канд. физ.-мат. наук П. Я. Чудаковский;
ст. преподаватель Н. С. Манкевич

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

В методических рекомендациях приводятся общие требования к решению задач, основные понятия и формулы по разделам физики «Механика», «Молекулярная физика и термодинамика», а также таблицы физических постоянных.

Учебно-методическое издание

ФИЗИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 66 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

1 Общие указания к решению задач.....	4
2 Физические основы механики	5
2.1 Основные формулы.....	5
2.2 Типовые задачи	10
3 Молекулярная физика и термодинамика	18
3.1 Основные формулы.....	18
3.2 Типовые задачи	23
Список литературы.....	29
Приложение А	30

1 Общие указания к решению задач

Предлагаемые методические рекомендации содержат задачи из двух разделов общего курса физики в соответствии с учебными программами курса, читаемого на кафедре «Физика», «Механика» и «Молекулярная физика и термодинамика». Данное издание предназначено для самостоятельной работы студентов и проведения практических занятий.

Решения задач следует начинать с краткой записи условия с приведением его к СИ. Значения физических величин и постоянных представлены в таблицах А.1–А.14. Решения необходимо сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями; в тех случаях, когда это возможно, дать чертеж, выполненный с помощью чертежных принадлежностей.

Решать задачу надо в общем виде, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

После получения расчетной формулы для проверки ее правильности следует подставить в правую часть формулы вместо символов величин обозначения единиц этих величин, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине. Если такого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.

Числовые значения величин при подстановке их в расчетную формулу следует выражать только в единицах СИ. В виде исключения допускается выражать в любых, но одинаковых единицах числовые значения однородных величин, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.

При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 3520 надо записать $3,52 \cdot 10^3$, вместо 0,00129 записать $1,29 \cdot 10^{-3}$ и т. п.

Вычисления по расчетной формуле необходимо проводить с соблюдением правил приближенных вычислений [6]. Как правило, окончательный ответ следует записывать с тремя значащими цифрами. Это относится и к случаю, когда результат получен с применением калькулятора.

2 Физические основы механики

2.1 Основные формулы

Кинематическое уравнение движения материальной точки (центра масс твердого тела) вдоль оси x

$$x = f(t),$$

где x – некоторая функция времени t .

Проекция средней скорости на ось x

$$\bar{V}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Средняя путевая скорость

$$\bar{V} = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

где Δs – путь, пройденный точкой за интервал времени Δt .

Путь Δs , в отличие от разности координат $\Delta x = x_2 - x_1$, не может убывать и принимать отрицательные значения, т. е. $\Delta s \geq 0$. Тогда проекция мгновенной скорости на ось x

$$V_x = \frac{dx}{dt}.$$

Проекция среднего ускорения на ось x

$$a_x = \frac{\Delta V_x}{\Delta t}.$$

Проекция мгновенного ускорения на ось x

$$a_x = \frac{dV_x}{dt}.$$

Кинематическое уравнение движения материальной точки по окружности

$$\varphi = f(t) \quad (r = R = \text{const}),$$

где φ – угловое перемещение.

Модуль угловой скорости

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Модуль углового ускорения

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}.$$

Связь между модулями линейных и угловых величин, характеризующих движение точки по окружности:

$$V = \omega \cdot R; \quad a_{\tau} = \varepsilon \cdot R; \quad a_n = \omega^2 \cdot R,$$

где V – модуль линейной скорости;

a_{τ} , a_n – модули тангенциального и нормального ускорений;

ω – модуль угловой скорости;

ε – модуль углового ускорения;

R – радиус окружности.

Модуль полного ускорения

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_{\tau}^2} \quad \text{или} \quad a = R\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}.$$

Угол между полным \vec{a} и нормальным \vec{a}_n ускорениями

$$\alpha = \arccos(a_n / a).$$

Импульс материальной точки массой m , движущейся со скоростью \vec{V} ,

$$\vec{p} = m \cdot \vec{V}.$$

Второй закон Ньютона

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}; \quad \vec{F} = m \cdot \vec{a},$$

где \vec{F} – результирующая сила, действующая на материальную точку массой m .

Силы, рассматриваемые в механике:

– сила упругости

$$F = -k \cdot \Delta x,$$

где k – коэффициент упругости (в случае пружины – жесткость);

Δx – абсолютная деформация;

– сила гравитационного взаимодействия

$$F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

где γ – гравитационная постоянная;

m_1, m_2 – массы взаимодействующих тел;
 r – расстояние между телами (тела рассматриваются как материальные точки);
 – сила тяжести

$$F = m \cdot g,$$

где g – ускорение свободного падения.

В случае гравитационного притяжения тела к Земле

$$g = \gamma \frac{M}{R^2},$$

где M, R – масса и радиус Земли соответственно;
 – сила трения (скольжения)

$$F = \mu \cdot N,$$

где μ – коэффициент трения;
 N – сила нормального давления.
 Закон сохранения импульса

$$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const}.$$

Для двух тел ($i = 2$)

$$m_1 \cdot \vec{V}_1 + m_2 \cdot \vec{V}_2 = m_1 \cdot \vec{U}_1 + m_2 \cdot \vec{U}_2,$$

где \vec{V}_1, \vec{V}_2 – скорости тел в момент времени, принятый за начальный;
 \vec{U}_1, \vec{U}_2 – скорости тех же тел в конечный момент времени.
 Кинетическая энергия тела, движущегося поступательно,

$$E_k = m \cdot V^2 / 2$$

или

$$E_k = p^2 / 2m.$$

Потенциальная энергия:
 – упругодеформированной пружины

$$E_n = k \cdot \Delta x^2 / 2,$$

где k – жесткость пружины;
 Δx – абсолютная деформация;

– гравитационного взаимодействия

$$E_n = -\frac{\gamma \cdot m_1 \cdot m_2}{r},$$

где γ – гравитационная постоянная;

m_1, m_2 – массы взаимодействующих тел;

r – расстояние между телами (тела рассматриваются как материальные точки);

– тела, находящегося в однородном поле силы тяжести,

$$E_n = m \cdot g \cdot h,$$

где g – ускорение свободного падения;

h – высота тела над уровнем, принятым за нулевой (формула справедлива при условии $h \ll R$, здесь R – радиус Земли).

Закон сохранения механической энергии

$$E = E_k + E_n = \text{const.}$$

Работа A , совершаемая результирующей силой, определяется как мера изменения кинетической энергии материальной точки:

$$A = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1}.$$

Основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси z

$$\vec{M}_z = J_z \cdot \vec{\varepsilon},$$

где \vec{M}_z – результирующий момент внешних сил относительно оси z , действующих на тело;

$\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение;

J_z – момент инерции относительно оси вращения.

Моменты инерции некоторых тел массой m относительно оси z , проходящей через центр масс тела:

– стержня длиной L относительно оси, перпендикулярной стержню,

$$J_z = \frac{1}{12} m \cdot L^2;$$

– обруча (тонкостенного цилиндра) относительно оси, перпендикулярной плоскости обруча (совпадающей с осью цилиндра),

$$J_z = m \cdot R^2,$$

где R – радиус обруча (цилиндра);

– диска радиусом R относительно оси, перпендикулярной плоскости диска,

$$J_z = \frac{1}{2} m R^2.$$

Проекция на ось z момента импульса тел, вращающихся относительно неподвижной оси z ,

$$L_z = J \cdot \omega,$$

где ω – угловая скорость тела.

Закон сохранения момента импульса систем тел, вращающихся вокруг неподвижной оси z ,

$$J_z \cdot \vec{\omega} = \text{const},$$

где J_z – момент инерции системы тел относительно оси z ;

$\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения тел системы вокруг оси z .

Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси z ,

$$E_k = J_z \cdot \omega^2 / 2$$

или

$$E_k = L_z^2 / (2J_z).$$

Релятивистское (лоренцево) сокращение длины стержня

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \beta^2},$$

где l_0 – длина стержня в системе, относительно которой стержень покоится (собственная длина);

l – длина стержня, относительно которой он движется;

β – скорость частицы, выраженная в долях скорости света, $\beta = V/c$.

Промежуток времени Δt в системе, движущейся по отношению к наблюдателю, связан с промежутком времени Δt_0 в неподвижной для наблюдателя системе отношением

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где m_0 – масса покоя.

Релятивистский импульс

$$p = m \cdot V = \frac{m_0 \cdot V}{\sqrt{1 - \beta^2}} = m_0 \cdot c \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Полная энергия релятивистской частицы

$$E = m \cdot c^2 = m_0 \cdot c^2 + T,$$

где T – кинетическая энергия частицы;

E_0 – энергия покоя частицы, $E_0 = m_0 \cdot c^2$.

Связь полной энергии с импульсом релятивистской частицы

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2.$$

Связь кинетической энергии с импульсом релятивистской частицы

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{T(T + 2E_0)}.$$

2.2 Типовые задачи

Кинематика поступательного и вращательного движений.

2.1 Движение материальной точки задано уравнением $X = A \cdot t + B \cdot t^2$, где $A = 4$ м/с ; $B = -0,05$ м/с². Определить момент времени, в который скорость точки равна 0. Найти координату и ускорение в этот момент.

2.2 Камень брошен горизонтально со скоростью 10 м/с. Определить радиус кривизны траектории камня через 3 с после начала движения.

2.3 Материальная точка движется прямолинейно. Уравнение движения имеет вид $X = 2 \cdot t + 0,04 \cdot t^3$. Найти скорость и ускорение за первые 5 с движения. Найти ускорение точки за пятую секунду движения.

2.4 Тело брошено со скоростью 10 м/с под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту. Найти радиус кривизны траектории тела через время 1 с после начала движения.

2.5 С балкона бросили мяч вертикально вверх с начальной скоростью 5 м/с, через 2 с мяч упал на землю. Определить высоту балкона над землёй и скорость мяча в момент удара о землю.

2.6 Тело брошено со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Найти скорость v_0 и угол α , если известно, что высота подъема тела 3 м и радиус кривизны траектории тела в верхней точке траектории 3 м.

2.7 Из пушки выпустили последовательно два снаряда со скоростью $v_0 = 250$ м/с: первый – под углом $\alpha_1 = 60^\circ$ к горизонту, второй – под углом $\alpha_2 = 45^\circ$ (азимут один и тот же). Найти интервал времени между выстрелами, при котором снаряды столкнутся друг с другом.

2.8 Камень брошен горизонтально со скоростью 10 м/с. Найти нормальное и тангенциальное ускорения и радиус кривизны траектории через 1 с после начала движения. Сопротивлением воздуха пренебречь.

2.9 Свободно падающее тело за последнюю секунду своего падения проходит путь $s = 100$ м. Определить полное время падения тела.

2.10 Точка движется по окружности радиусом $R = 2$ см. Зависимость пройденного пути от времени задаётся уравнением $X = A \cdot t^3$, где $A = 0,1$ м/с³. Найти нормальное и тангенциальное ускорения точки в момент, когда её линейная скорость $v = 0,3$ м/с.

2.11 Зависимость пройденного телом пути по окружности радиусом $R = 3$ м задаётся уравнением $X = A \cdot t^2 + B \cdot t$, где $A = 0,4$ м/с²; $B = 0,1$ м/с. Определить для момента времени $t = 1$ с после начала движения ускорения: нормальное, тангенциальное, полное.

2.12 Колесо радиусом $R = 0,1$ м вращается так, что угловое перемещение меняется по закону $\varphi = A \cdot t + B \cdot t^3$, где $A = 2$ рад/с; $B = 1$ рад/с³. Для точек, лежащих на ободе колеса, найти угловую скорость, угловое ускорение, нормальное, тангенциальное и полное ускорения через 1 с после начала движения.

2.13 Вал вращается с постоянной частотой 180 об/мин. С некоторого момента он тормозится и вращается равнозамедленно с угловым ускорением, равным 3 рад/с². Через сколько времени вал остановится? Сколько оборотов он сделает до остановки?

2.14 Найти угловое ускорение колеса, если через время $t = 2$ с после начала движения вектор полного ускорения точки, лежащей на ободе, составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с вектором её линейной скорости.

2.15 Точка движется по окружности радиусом $R = 2$ м согласно уравнению $\varphi = A \cdot t^2$, где $A = 2$ м/с. В какой момент времени t нормальное ускорение a_n точки будет равно тангенциальному a_τ ? Определить полное ускорение в этот момент.

2.16 На цилиндр радиусом $R = 4$ см, который может вращаться около горизонтальной оси, намотана нить. К концу нити привязали грузик и предоставили ему возможность опускаться. Двигаясь равноускоренно, грузик за время $t = 3$ с опустился на $h = 1,5$ м. Определить угловое ускорение ε цилиндра.

2.17 Диск вращается с угловым ускорением $\varepsilon = -2$ рад/с². Сколько оборотов N сделает диск при изменении частоты вращения от $n_1 = 240$ мин⁻¹ до $n_2 = 90$ мин⁻¹? Найти время Δt , в течение которого это произойдёт.

2.18 Найти радиус R вращающегося колеса, если известно, что линейная скорость точки, лежащей на ободе, в 3 раза больше линейной скорости точки, лежащей на 6 см ближе к оси колеса.

2.19 Точка движется с постоянной скоростью $v = 1$ м/с по окружности. Определить ее центростремительное ускорение, если за 3 с вектор скорости изменяет свое направление на угол 45° .

2.20 Точка движется по окружности радиусом $R = 30$ см с постоянным угловым ускорением. Определить тангенциальное ускорение точки, если

известно, что за время $t = 4$ с она совершила три оборота и в конце третьего оборота её нормальное ускорение стало равно $2,7 \text{ м/с}^2$.

Динамика поступательного движения.

2.21 Автомобиль массой $m = 5000$ кг останавливается при торможении за $t = 8$ с, пройдя при этом расстояние $S = 33$ м. Найти начальную скорость автомобиля и силу торможения, считая движение равнозамедленным.

2.22 С какой максимальной скоростью может ехать мотоциклист по горизонтальной плоскости, описывая дугу радиусом $r = 90$ м, если коэффициент трения колес о почву $\mu = 0,4$? На какой угол от вертикали должен отклониться мотоциклист при скорости $V_1 = 15 \text{ м/с}$?

2.23 Верёвка выдерживает груз массой $m_1 = 110$ кг при вертикальном подъеме его с некоторым ускорением и груз массой $m_2 = 690$ кг при опускании его с таким же по модулю ускорением. Какой груз можно поднять с помощью этой веревки при равномерном подъеме? Сопротивлением воздуха пренебречь.

2.24 Брусок скользит с наклонной плоскости длиной 42 см и высотой 7 см и далее по горизонтальной плоскости на расстояние 142 см, после чего останавливается. Определить коэффициент трения, считая его везде одинаковым.

2.25 На наклонной плоскости находится груз массой $m_1 = 5$ кг, связанный нитью, перекинутой через блок, с другим грузом массой $m_2 = 2$ кг. Коэффициент трения между первым грузом и плоскостью $\mu = 0,1$, угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 37^\circ$. Определить ускорения грузов (рисунок 1).

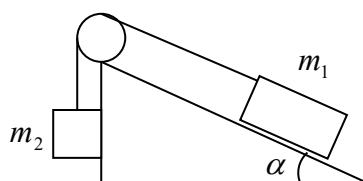


Рисунок 1

2.26 Тело массой $m = 1$ кг движется так, что его координаты X и Y изменяются от времени следующим образом: $X = A - Bt + Ct^2$, $Y = Dt^3$, где $C = 1 \text{ м/с}^2$; $D = 2 \text{ м/с}^3$. Определить ускорение тела и действующую на тело силу к концу 5 с.

2.27 Чтобы удержать брусок массой $m = 2$ кг на наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30^\circ$, к нему приложили силу, направленную вдоль наклонной плоскости. Коэффициент трения между бруском и поверхностью плоскости $\mu = 0,2$. Чему равна эта сила?

2.28 На тело массой 10 кг, лежащее на наклонной плоскости (угол 20°), действует горизонтально направленная сила $F = 8$ Н. Пренебрегая трением, определить ускорение тела.

2.29 Камень, подвешенный к потолку на верёвке длиной 1,8 м, движется в горизонтальной плоскости по окружности, отстоящей от потолка на расстоянии 1,25 м. Найти частоту вращения камня.

2.30 На тело массой $m = 2$ кг, вначале покоившееся на горизонтальной

плоскости, в течение времени $t = 2,6$ с действует горизонтальная сила $F = 12$ Н. Коэффициент трения о плоскость $\mu = 0,1$. Какое расстояние S пройдет тело за время движения?

Работа и энергия. Законы сохранения импульса и энергии.

2.31 Работа, затраченная на толкание ядра, брошенного под углом 30° к горизонту, $A = 216$ Дж. Через сколько времени и на каком расстоянии от места бросания ядро упадет на землю? Масса ядра 2 кг. Соппротивление воздуха не учитывать.

2.32 Найти, какую мощность развивает двигатель автомобиля, если известно, что масса автомобиля $m = 1$ т и он едет в гору с уклоном 5 м на каждые 100 м пути с постоянной скоростью 36 км/ч. Коэффициент трения $\mu = 0,07$.

2.33 Какую минимальную работу необходимо совершить, чтобы лежащий на земле стержень длиной $l = 2$ м и массой $m = 100$ кг поставить вертикально?

2.34 Шарик массой $m = 0,1$ кг, подвешенный на нити длиной $l = 1$ м, раскрутили так, что он начал двигаться по окружности в горизонтальной плоскости. Чему будет равна работа по раскручиванию шарика, если при движении нить образует с вертикалью угол $\alpha = 60^\circ$?

2.35 С башни высотой $h = 25$ м горизонтально брошен камень со скоростью $v_0 = 15$ м/с. Найти кинетическую и потенциальную энергии камня через время $t = 1$ с после начала движения. Масса камня $m = 0,2$ кг.

2.36 Подвешенный на нити шарик массой $m = 200$ г отклоняют на угол 45° . Определить силу натяжения нити в момент прохождения шариком положения равновесия.

2.37 В тело массой 990 г, лежащее на горизонтальной поверхности, попадает пуля массой 10 г и застревает в нём. Скорость пули направлена горизонтально и равна 700 м/с. Какой путь пройдёт тело до остановки, если коэффициент трения между телом и поверхностью $\mu = 0,05$?

2.38 Тело скользит сначала по наклонной плоскости, составляющей угол $\alpha = 8^\circ$ с горизонтом, а затем по горизонтальной поверхности. Найти, чему равен коэффициент трения, если известно, что тело проходит по горизонтали такое же расстояние, как и по наклонной плоскости.

2.39 Тело массой $m = 3$ кг, имея начальную скорость $v_0 = 0$ м/с, скользит по наклонной поверхности высотой $h = 0,5$ м и длиной склона $L = 1$ м. К основанию наклонной плоскости оно приходит со скоростью $v = 2,45$ м/с. Найти коэффициент трения тела о плоскость и количество теплоты Q , выделившееся при трении.

2.40 Мяч массой 150 г, движущийся со скоростью 6 м/с, ударяется о стенку так, что угол между векторами скорости до удара и после удара равен 60° . Считая удар упругим, определить его продолжительность, если известно, что сила удара 20 Н.

2.41 Человек, стоящий на неподвижной тележке, бросает в горизонтальном направлении камень массой $m = 2$ кг. Тележка с человеком покатила назад, и в первый момент после броска её скорость $v = 0,1$ м/с. Масса тележки с

человеком $M = 100$ кг. Найти кинетическую энергию брошенного камня через время $t = 0,5$ с после начала движения.

2.42 Снаряд, имеющий скорость $v = 100$ м/с в верхней точке траектории, на высоте $h = 100$ м разорвался на две части массами $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 1,5$ кг. Скорость большего осколка $V_2 = 250$ м/с и по направлению совпадает с V . Определить расстояние между точками падения обоих осколков. Спротивлением воздуха пренебречь.

2.43 Летящий снаряд разорвался на два осколка с одинаковыми массами. Угол между векторами V_1 и V_2 равен 90° . Модули скоростей осколков составляют $V_1 = 300$ м/с и $V_2 = 400$ м/с. Найти скорость снаряда до разрыва.

2.44 В шар массой $M = 5$ кг, висящий на нити длиной $L = 49$ см, попадает пуля массой $m = 20$ г, летящая с горизонтальной скоростью $v_1 = 1000$ м/с. Пробив шар, пуля продолжает движение в том же направлении со скоростью $v = 500$ м/с. Определить угол отклонения нити от вертикали.

2.45 Два тела массами m и $2m$ движутся по взаимно перпендикулярным направлениям с равными скоростями. В результате удара тело массой m останавливается. Какую часть его энергии составляет выделившаяся при ударе теплота?

2.46 Тело массой 5 кг ударяется о неподвижное тело массой 2,5 кг, которое после удара начинает двигаться с кинетической энергией в 5 Дж. Считая удар центральным и упругим, найти кинетическую энергию первого тела до и после удара.

2.47 Два шара массами $m_1 = 9$ кг и $m_2 = 12$ кг подвешены на нитях длиной $L = 1,5$ м. Первоначально шары соприкасаются между собой, затем меньший шар отклонили на угол $\alpha = 30^\circ$ и отпустили. Считая удар неупругим, определить высоту h , на которую поднимутся оба шара после удара.

2.48 Стальной шарик массой $m = 20$ кг, падая с высоты $h_1 = 1$ м на стальную плиту, отскакивает от неё на высоту $h_2 = 81$ см. Найти импульс силы, полученный плитой за время удара, и количество теплоты, выделившееся при ударе.

2.49 Пуля, летящая горизонтально, попадает в шар, подвешенный на невесомом жёстком стержне, и застревает в нём. Масса пули $m_1 = 5$ г, масса шара $m_2 = 5$ кг. Скорость пули $v_1 = 500$ м/с. При какой предельной длине стержня шар от удара пули поднимается до верхней точки окружности?

2.50 При центральном упругом ударе движущееся тело массой m_1 ударяется в покоящееся тело массой m_2 , в результате чего скорость первого тела уменьшается в 2 раза.

Определить:

- во сколько раз масса первого тела больше массы второго;
- кинетическую энергию E_2 второго тела непосредственно после удара, если кинетическая энергия E первого тела непосредственно перед ударом равна 800 Дж.

Динамика вращательного движения.

2.51 Определить момент инерции J тонкого однородного стержня длиной $l = 30$ см и массой $m = 100$ г относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку, отстоящую от конца стержня на $1/3$ его длины.

2.52 Диаметр диска $d = 20$ см, масса $m = 800$ г. Определить момент инерции J диска относительно оси, проходящей через середину одного из радиусов перпендикулярно плоскости диска.

2.53 На обод маховика диаметром $d = 60$ см намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m = 2$ кг. Определить момент инерции J маховика, если он, вращаясь равноускоренно под действием силы тяжести груза, за время $t = 3$ с приобрел угловую скорость $\omega = 9$ рад/с.

2.54 Через блок, имеющий форму диска, перекинут шнур. К концам шнура привязали грузики массами $m_1 = 100$ г и $m_2 = 110$ г. С каким ускорением a будут двигаться грузики, если масса m блока равна 400 г? Трение при вращении блока ничтожно мало.

2.55 Шар массой $m = 10$ кг и радиусом $R = 20$ см вращается относительно оси, проходящей через его центр. Уравнение вращения шара имеет вид $\varphi = A + Bt^2 + Ct^3$, где $B = 4$ рад/с²; $C = -1$ рад/с³. Найти закон изменения момента сил, действующих на шар. Определить момент сил M в момент времени $t = 2$ с.

2.56 Через неподвижный блок массой $m = 0,2$ кг перекинут шнур, к концам которого подвесили грузы массами $m_1 = 0,3$ кг и $m_2 = 0,5$ кг. Определить силы T_1 и T_2 натяжения шнура по обе стороны блока во время движения грузов, если масса блока равномерно распределена по ободу.

2.57 Шкив радиусом $R = 5$ см жестко связан с маховиком и имеет с ним общую ось вращения. Момент инерции системы $J = 105$ г·см². На шкив намотана нить, к концу которой прикреплен груз массой $m = 0,5$ кг. Какое ускорение приобретает груз, опустившись с высоты $h = 0,5$ м? Каково будет натяжение нити во время движения груза?

2.58 К ободу однородного диска радиусом $R = 0,2$ м приложена касательная сила $F = 98,1$ Н. При вращении на диск действует момент сил трения $M_{тр} = 4,9$ Н·м. Найти массу диска, если известно, что он вращается с угловым ускорением $\varepsilon = 100$ рад/с².

2.59 Тонкий однородный стержень длиной $l = 50$ см и массой $m = 400$ г вращается с угловым ускорением $\varepsilon = 3$ рад/с² около оси, проходящей перпендикулярно стержню через его середину. Определить вращающий момент M .

2.60 Маховик в виде однородного диска массой $m = 50$ кг и радиусом $R = 20$ см был раскручен до частоты $n = 480$ об/мин и затем предоставлен самому себе. Под влиянием трения через $t = 50$ с он остановился, сделав $N = 200$ оборотов. Найти момент силы трения.

Законы сохранения во вращательном движении.

2.61 Маховик, момент инерции которого $J = 245$ кг·м², вращается с частотой $n = 20$ об/с. После того, как на колесо перестал действовать вращающий момент, оно остановилось, сделав $N = 1000$ об. Найти момент сил трения $M_{тр}$

и время t , прошедшее от момента прекращения действия вращающего момента до остановки колеса.

2.62 Маховик начинает вращаться с постоянным угловым ускорением $\varepsilon = 0,5 \text{ рад/с}^2$ и через время $t_1 = 15 \text{ с}$ после начала движения приобретает момент импульса $L_1 = 73,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$. Найти кинетическую энергию колеса через время $t_2 = 20 \text{ с}$ после начала движения.

2.63 Кинетическая энергия E_k вращающегося маховика равна 1 кДж. Под действием постоянного тормозящего момента маховик начал вращаться равномерно замедленно и, сделав $N = 80$ оборотов, остановился. Определить момент силы торможения.

2.64 Шар и сплошной цилиндр одинаковой массы, изготовленные из одного и того же материала, катятся без скольжения с одинаковой скоростью. Определить, во сколько раз кинетическая энергия шара меньше кинетической энергии сплошного цилиндра.

2.65 Колесо, вращаясь равномерно замедленно при торможении, уменьшило за $t = 1$ мин частоту вращения от 300 до 180 об/мин. Момент инерции колеса $J = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Найти: работу торможения; число оборотов, сделанных колесом за эту минуту.

2.66 Маховик вращается с частотой $n = 10 \text{ об/с}$. Его кинетическая энергия $E_k = 7,85 \text{ кДж}$. За какое время t момент сил $M = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$, приложенный к маховику, увеличит его угловую скорость вдвое?

2.67 Обруч и диск, имеющие одинаковую массу $m_1 = m_2$, катятся без скольжения с одинаковой скоростью v . Кинетическая энергия обруча $E_{k1} = 39,2 \text{ Дж}$. Найти кинетическую энергию диска E_{k2} .

2.68 Шар катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Его полная кинетическая энергия E_k равна 14 Дж. Определить кинетическую энергию E_{k1} поступательного и E_{k2} вращательного движений шара.

2.69 Полый тонкостенный цилиндр катится по горизонтальной плоскости со скоростью $v_0 = 1,5 \text{ м/с}$. Определить путь, который он пройдет в гору за счет кинетической энергии, если уклон горы равен 5 м на каждые 100 м пути.

2.70 Шар массой $m = 1 \text{ кг}$, катящийся без скольжения, ударяется о стенку и откатывается от неё. Скорость шара до удара о стенку $v = 10 \text{ см/с}$, после удара $u = 8 \text{ см/с}$. Найти количество теплоты Q , выделившееся при ударе шара о стенку.

2.71 Карандаш длиной $l = 15 \text{ см}$, поставленный вертикально, падает на стол. Какую угловую и линейную v скорости будет иметь в конце падения: середина карандаша; верхний его конец? Считать, что трение настолько велико, что нижний конец карандаша не проскальзывает.

2.72 Маховик в виде диска массой $m = 80 \text{ кг}$ и радиусом $R = 30 \text{ см}$ находится в состоянии покоя. Какую работу A_1 надо совершить, чтобы сообщить маховику частоту $n_1 = 10 \text{ с}^{-1}$? Какую работу A_2 пришлось бы совершить, если бы при такой же массе диск имел меньшую толщину, но вдвое больше радиус?

2.73 Платформа в виде однородного диска $m = 100 \text{ кг}$ вращается с частотой $n_1 = 10 \text{ мин}^{-1}$. На краю платформы стоит человек, масса которого $m_1 = 60 \text{ кг}$. С какой частотой n_2 будет вращаться платформа, если человек

перейдет в ее центр? Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

2.74 На скамье Жуковского стоит человек и держит в руках стержень длиной $l = 2,4$ м и массой $m = 8$ кг, расположенный вертикально по оси вращения скамейки. Скамья с человеком вращается с частотой $n_1 = 1$ с⁻¹. С какой частотой n_2 будет вращаться скамья с человеком, если он повернет стержень в горизонтальное положение? Суммарный момент инерции человека и скамьи равен 6 кг·м².

2.75 Тонкий прямой стержень длиной $l = 1$ м прикреплен к горизонтальной оси, проходящей через его конец. Стержень отклонили на угол 60° от положения равновесия и отпустили. Определить линейную скорость v нижнего конца стержня в момент прохождения через положение равновесия.

Релятивистская механика.

2.76 Определить скорость, при которой релятивистское сокращение линейных размеров тела составляет 10 %.

2.77 Собственное время жизни нестабильной частицы $\Delta t_0 = 10$ нс. Какой путь пролетит эта частица до распада в лабораторной системе отсчета, где ее время жизни $\Delta t = 20$ нс?

2.78 В системе K' покоится стержень, собственная длина которого равна 1 м. Стержень расположен так, что составляет угол 45° с осью X' . Определить длину системы стержня и угол в системе K , если скорость системы K' относительно K равна $0,8$ с.

2.79 Определить релятивистский импульс электрона, кинетическая энергия которого $T = 1$ ГэВ.

2.80 Сколько времени пройдет на земле, если в ракете, движущейся со скоростью $v = 0,95$ с относительно Земли, пройдет $t = 10$ лет?

2.81 Один близнец отправляется в космическое путешествие, другой остается на Земле, причем путешествие длится 40 лет (по земным часам) со скоростью $v = 0,2$ с. Определить, на сколько моложе окажется космический путешественник.

2.82 Во сколько раз релятивистская масса частицы, скорость которой отличается от скорости света на 0,01 %, превышает ее массу покоя?

2.83 Найти скорость, при которой релятивистский импульс частицы в 2 раза превышает её ньютоновский импульс.

2.84 Какую работу надо совершить, чтобы увеличить скорость частицы с массой m от $0,6$ до $0,8$ с? Сравнить результат со значением, вычисленным по нерелятивистской формуле.

2.85 При какой скорости кинетическая энергия любой частицы равна ее энергии покоя?

3 Молекулярная физика и термодинамика

3.1 Основные формулы

Количество вещества тела (системы)

$$\nu = N / N_A,$$

где N – число структурных элементов (молекул, атомов, ионов и т. п.), составляющих тело (систему);

N_A – постоянная Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Молярная масса вещества

$$\mu = m / \nu,$$

где m – масса однородного тела (системы);

ν – количество вещества этого тела.

Количество вещества смеси газов

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n = N_1 / N_A + N_2 / N_A + \dots + N_n / N_A$$

или

$$\nu = m_1 / \mu_1 + m_2 / \mu_2 + \dots + m_n / \mu_n,$$

где ν_i , N_i , m_i , μ_i – количество вещества, число молекул, масса, молярная масса i -го компонента смеси соответственно.

Уравнение Менделеева – Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T,$$

где m – масса газа;

μ – молярная масса газа;

R – молярная газовая постоянная;

ν – количество вещества;

T – термодинамическая температура.

Опытные газовые законы, являющиеся частными случаями уравнения Менделеева – Клапейрона для изопроецессов:

– закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс: $T = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$p \cdot V = \text{const},$$

или для двух состояний газа

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2;$$

– закон Гей – Люссака (изобарный процесс: $p = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$\frac{V}{T} = \text{const},$$

или для двух состояний газа

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$

– закон Шарля (изохорный процесс: $V = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$\frac{p}{T} = \text{const},$$

или для двух состояний

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

– объединенный газовый закон ($m = \text{const}$)

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2},$$

где p_1 , V_1 , T_1 , p_2 , V_2 , T_2 – давление, объем и температура газа в начальном и конечном состояниях соответственно.

Закон Дальтона, определяющий давление смеси газов,

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

где p_i – парциальные давления компонентов смеси;

n – число компонентов смеси.

Парциальным давлением называется давление газа, которое производил бы этот газ, если бы только он один находился в сосуде, занятом смесью.

Молярная масса смеси газов

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n},$$

где m_i – масса i -го компонента смеси;

v_i – количество вещества i -го компонента смеси, $v_i = m_i / \mu_i$;

n – число компонентов смеси.

Массовая доля i -го компонента смеси газа (в долях или процентах)

$$\omega_i = m_i / m,$$

где m – масса смеси.

Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho N_A}{\mu},$$

где N – число молекул, содержащихся в данной системе;

ρ – плотность вещества;

V – объем системы.

Формула справедлива не только для газов, но и для любого агрегатного состояния вещества.

Основное уравнение кинетической теории газов

$$p = 2/3 n \cdot \overline{\varepsilon_n},$$

где $\overline{\varepsilon_n}$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\overline{\varepsilon_n} = 3/2 k \cdot T,$$

где k – постоянная Больцмана.

Средняя полная кинетическая энергия молекулы

$$\overline{\varepsilon_n} = \frac{i}{2} k \cdot T,$$

где i – число степеней свободы молекулы.

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = n \cdot k \cdot T.$$

Скорости молекул:

– средняя квадратичная

$$\overline{V_{кв}} = \sqrt{\frac{3k \cdot T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3R \cdot T}{\mu}};$$

– средняя арифметическая

$$\overline{V} = \sqrt{\frac{8k \cdot T}{\pi \cdot m_0}} = \sqrt{\frac{8R \cdot T}{\pi \cdot \mu}};$$

– наиболее вероятная

$$V_B = \sqrt{\frac{2k \cdot T}{m_0}} = \sqrt{\frac{2R \cdot T}{\mu}},$$

где m_0 – масса одной молекулы.

Относительная скорость молекулы

$$u = V/V_0,$$

где V – скорость данной молекулы.

Среднее число столкновений молекулы газа за 1 с

$$\bar{Z} = \sqrt{2}\pi \cdot d^2 \cdot n \cdot \bar{V},$$

где d – эффективный диаметр молекулы газа;

n – концентрация молекул газа;

\bar{V} – средняя арифметическая скорость молекул газа.

Средняя длина свободного пробега молекул (расстояние, проходимое молекулой газа между двумя последовательными столкновениями)

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \cdot d^2 \cdot n}.$$

Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме C_v и постоянном давлении C_p определяются по формулам

$$C_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{\mu}; \quad C_p = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{R}{\mu}.$$

Связь между удельной c и молярной C теплоемкостями

$$c = C / \mu; \quad C = c \cdot \mu.$$

Уравнение Майера

$$C_p - C_v = R.$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R \cdot T = \frac{m}{\mu} \cdot C_v \cdot T.$$

Первое начало термодинамики

$$Q = \Delta U + A,$$

где Q – теплота, сообщенная системе (газу);

ΔU – изменение внутренней энергии системы;

A – работа, совершенная системой против внешних сил.

Работа расширения газа:

– в общем случае

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV;$$

– при изобарном процессе

$$A = p (V_2 - V_1);$$

– при изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1};$$

– при адиабатном процессе

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} C_V \cdot \Delta T \quad \text{или} \quad A = \frac{R \cdot T_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{\mu} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right],$$

где γ – показатель адиабаты, $\gamma = C_p/C_V$.

Уравнения Пуассона, связывающие параметры идеального газа при адиабатном процессе:

$$p \cdot V^\gamma = \text{const}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) цикла

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – теплота, полученная рабочим телом от нагревателя;

Q_2 – теплота, переданная рабочим телом холодильнику.

КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1, T_2 – температуры нагревателя и холодильника.

Разность энтропий двух состояний B и A определяется формулой

$$\Delta S = \int_A^B \frac{dQ}{T}.$$

3.2 Типовые задачи

Молекулярно-кинетическая теория вещества. Газовые законы.

3.1 Найти число молекул газа N , средняя квадратичная скорость которых при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ равна 500 м/с , если масса газа $m = 10\text{ г}$.

3.2 Плотность одного газа при давлении 400 кПа $\rho_1 = 1,6\text{ кг/м}^3$. Вторым газом массой 2 кг занимает объем 10 м^3 при давлении 200 кПа . Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул второго газа больше, чем первого?

3.3 Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы газа, находящегося под давлением $0,1\text{ Па}$. Концентрация молекул газа равна 10^{13} см^{-3} .

3.4 Определить среднюю квадратичную скорость молекулы аргона при давлении 20 кПа . Концентрация молекул этого газа при указанном давлении составляет $3 \cdot 10^{25}\text{ м}^{-3}$.

3.5 Во сколько раз изменится давление одноатомного газа в результате одновременного уменьшения его объема в 3 раза и увеличения средней кинетической энергии молекул в 2 раза?

3.6 Чему равна энергия теплового движения 20 г кислорода при температуре 10°C ? Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения и какая – на долю вращательного?

3.7 В баллоне находится газ при температуре $t = 17^\circ\text{C}$. Во сколько раз уменьшится давление этого газа, если 20% его выйдет из баллона, а температура при этом понизится на $\Delta t = 10^\circ\text{C}$?

3.8 Какая часть газа осталась в баллоне, давление в котором было $p_1 = 1,2 \cdot 10^7\text{ Па}$, а температура $t_1 = 27^\circ\text{C}$, если давление упало до 10^5 Па и баллон при этом охладился до $t_2 = -23^\circ\text{C}$?

3.9 Найти плотность ρ смеси кислорода O_2 и углекислого газа CO_2 . Масса кислорода $m_1 = 50\text{ г}$, масса углекислого газа $m_2 = 80\text{ г}$. Смесь газов находится под давлением $p = 5\text{ МПа}$ и при температуре $t = 7^\circ\text{C}$.

3.10 Баллон объемом $V = 30\text{ л}$ содержит смесь водорода и гелия при температуре $T = 300\text{ К}$ и давлении $p = 828\text{ кПа}$. Масса смеси $m = 24\text{ г}$. Определить массу m_1 водорода и массу m_2 гелия.

3.11 Плотность некоторого газа при температуре $t = 10^\circ\text{C}$ и давлении $0,2\text{ МПа}$ равна $0,34\text{ кг/м}^3$. Чему равна молярная масса этого газа?

3.12 Определить среднюю молярную массу смеси газов, состоящей из 1 кг водорода, 4 кг гелия и 16 кг кислорода.

3.13 В открытом сосуде находится 90 г газа. Температуру газа увеличивают в $1,5$ раза при постоянном давлении. Во сколько раз при этом уменьшается плотность газа?

3.14 Определить разность температур начального и конечного состояний газа, если сначала его объем изобарически увеличили в 2 раза, а затем изохорически уменьшили в 2 раза его давление. Температура начального состояния равна 300 К. Масса газа остается постоянной.

3.15 В цилиндрическом сосуде поршень массой $m = 75$ кг начинает двигаться вверх. Давление газа под поршнем постоянно и равно 450 кПа, атмосферное давление составляет 100 кПа, площадь поршня $S = 50$ см². Определить скорость поршня, когда он пройдет 4 м. Трение не учитывать.

Элементы классической статистики. Явления переноса.

3.16 Найти коэффициент диффузии водорода при нормальных условиях, если средняя длина свободного пробега молекул при этих условиях равна $1,6 \cdot 10^{-7}$ м.

3.17 Коэффициенты диффузии и внутреннего трения водорода при некоторых условиях равны соответственно $D = 1,42$ см²/с и $\eta = 8,5 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м². Найти число молекул водорода в 1 м³ при этих условиях.

3.18 Найти коэффициент теплопроводности воздуха при температуре 10 °С и давлении 10^5 Па. Эффективный диаметр молекулы воздуха принять равным 0,3 нм.

3.19 Пространство между двумя параллельными пластинами площадью 150 см² каждая, находящимися на расстоянии 5 мм друг от друга, заполнено кислородом. Одна пластина поддерживается при температуре 17 °С, другая – при температуре 27 °С. Определить количество теплоты Q , прошедшее за время 5 мин посредством теплопроводности от одной пластины к другой. Кислород находится при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекул кислорода считать равным 0,36 нм.

3.20 Определить массу азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку 50 см² за 20 с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном площадке, равен 1 кг/м⁴. Температура азота 290 К, а средняя длина свободного пробега его молекул равна 1 мкм.

3.21 В сосуде находится кислород при нормальных условиях. Найти среднее число столкновений молекул Z в этом объеме за время $t = 2$ с. Эффективный диаметр молекул кислорода считать равным 0,27 нм.

3.22 Во сколько раз уменьшится среднее число столкновений в 1 с молекул двухатомного газа, если объем газа адиабатически увеличить в 2 раза?

3.23 Какое давление надо создать внутри сферического сосуда, диаметр которого равен 100 см, чтобы молекулы не сталкивались друг с другом? Эффективный диаметр молекулы газа считать равным 0,3 нм, а температуру газа равной 0 °С.

3.24 При температуре 47 °С и некотором давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода равна 40 нм. В результате изотермического сжатия объем газа уменьшился в 2 раза. Определить среднее число столкновений молекул за 1 с в конце сжатия.

3.25 Средняя квадратичная скорость молекулы углекислого газа при давлении $P = 10^5$ Па равна 628 м/с. Определить среднюю длину свободного пробега

молекул. Эффективный диаметр молекулы считать равным 0,4 нм.

3.26 Какая часть молекул водорода при $t = 0$ °С обладает скоростями от $v_1 = 2000$ м/с до $v_2 = 2100$ м/с?

3.27 Какая часть молекул имеет модуль скорости, лежащий между $v = v_g/2$ и $v = 2v_g$?

3.28 Какая часть молекул азота, находящегося при температуре $T = 400$ К, имеет скорости, лежащие в интервале $v_k + \Delta v$, где $\Delta v = 20$ м/с?

3.29 На какой высоте h над поверхностью Земли атмосферное давление вдвое меньше, чем на её поверхности? Считать, что температура воздуха равна 17 °С и не изменяется с высотой.

3.30 Пылинки, взвешенные в воздухе, имеют массу $m = 10^{-18}$ г. Во сколько раз уменьшится их концентрация при увеличении высоты на $\Delta h = 10$ м? Температура воздуха $T = 300$ К.

Первое начало термодинамики. Теплоемкость.

3.31 Некоторый газ находится в баллоне объемом 100 л при температуре 350 К и давлении 0,2 МПа. Теплоемкость этого газа при постоянном объеме $C_V = 140$ Дж/К. Определить отношение C_p/C_V .

3.32 Определить удельные теплоемкости c_V и c_p смеси, содержащей азот массой $m_1 = 8$ кг и водяной пар массой $m_2 = 8$ кг, принимая эти газы за идеальные.

3.33 Некоторый газ массой $m = 2$ кг при температуре $T = 410$ К занимает объем $V = 0,1$ м³. Определить давление газа, если его удельная теплоемкость $c_p = 519$ Дж/(кг·К) и $\gamma = 1,67$.

3.34 Каковы удельные теплоемкости c_V и c_p смеси газов, содержащей кислород массой $m_1 = 14$ г и азот массой $m_2 = 24$ г?

3.35 Найти отношение C_p/C_V для смеси газов, состоящей из гелия массой $m_1 = 12$ г и водорода массой $m_2 = 2$ г.

3.36 Найти показатель адиабаты смеси водорода и неона, если массовые доли обоих газов в смеси одинаковы.

3.37 Разность удельных теплоемкостей $c_p - c_V$ некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг·К). Найти молярную массу M газа и его удельные теплоемкости c_V и c_p .

3.38 Определить удельную теплоемкость c_V смеси газов, содержащей $V_1 = 5$ л водорода и $V_2 = 3$ л гелия. Газы находятся при одинаковых условиях.

3.39 Найти показатель адиабаты γ для смеси газов, содержащей гелий массой $m_1 = 10$ г и водород массой $m_2 = 4$ г.

3.40 Найти удельные теплоемкости c_V и c_p некоторого газа, если известно, что масса 1 кмоль этого газа равна $M = 30$ кг/кмоль и отношение $C_p/C_V = 1,4$.

3.41 Кислород массой $m = 4$ кг занимал объем $V_1 = 1,4$ м³ при давлении $p_1 = 0,3$ МПа. Газ нагревали сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3,4$ м³, а затем при постоянном объеме до давления $p_2 = 0,6$ МПа. Определить изменение внутренней энергии газа, совершенную газом работу и количество теплоты, ему сообщенное.

3.42 При изотермическом расширении водорода массой $m = 3$ г объем газа V_1 увеличился в 2 раза. Определить работу расширения, совершенную газом, если температура газа $T = 290$ К. Определить количество теплоты, переданное при этом газу.

3.43 В цилиндре под поршнем находился азот массой $m = 22$ г. Газ нагрели от 310 до 460 К при постоянном давлении. Определить количество теплоты, переданное газу, совершенную газом работу и приращение внутренней энергии.

3.44 Кислород нагревают от $t_1 = 50$ °С до $t_2 = 60$ °С. Масса кислорода $m = 160$ г. Найти количество поглощенной теплоты и изменение внутренней энергии при изохорном и изобарном процессах. Начальное давление близко к атмосферному.

3.45 Определить работу расширения $m = 1,2$ кг водорода при постоянном давлении и количество теплоты, переданное водороду, если в процессе нагревания температура газа повысилась на $\Delta T = 120$ К.

3.46 Азот, занимавший при давлении $p_1 = 10^5$ Па объем $V_1 = 10$ л, расширяется вдвое. Найти конечное давление и работу, совершенную газом при изотермическом процессе.

3.47 Газ, занимавший объем 25 л при нормальных условиях, был изобарически нагрет до температуры 385 К. Определить работу расширения газа.

3.48 Найти изменение внутренней энергии одного моля двухатомного идеального газа, изобарически расширившегося от объема $V_1 = 10$ л до объема $V_2 = 20$ л при давлении $p = 0,5$ МПа.

3.49 Воздух, находящийся под давлением $p_1 = 0,6$ МПа, был адиабатически сжат до давления $p_2 = 1,5$ МПа. Каково будет давление p_3 , когда сжатый воздух при постоянном объеме охладится до первоначальной температуры?

3.50 Азот, занимавший при давлении $p_1 = 10^5$ Па объем $V_1 = 10$ л, расширяется вдвое. Найти конечное давление и работу, совершенную газом при адиабатном процессе.

Круговые процессы.

3.51 Совершая цикл Карно, газ получил от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 1002$ Дж и совершил работу $A = 202$ Дж. Температура нагревателя $T_1 = 375$ К. Определить температуру холодильника.

3.52 Газ совершил цикл Карно. Температура нагревателя 480 К, холодильника 260 К. При изотермическом расширении газ совершил работу $A_p = 100$ Дж. Определить термический КПД η цикла, а также количество теплоты Q_2 , которое газ отдает холодильнику при изотермическом сжатии.

3.53 Газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в $n = 3,5$ раза выше, чем температура холодильника. Нагреватель передал газу $Q = 15$ Дж теплоты. Какую работу совершил газ?

3.54 Найти КПД цикла, проводимого с идеальным двухатомным газом и состоящего из двух изотерм с температурами $T_1 = 390$ К и $T_2 = 290$ К и двух изохор с объемами $V_1 = 20$ л и $V_2 = 10$ л.

3.55 Температура пара, поступающего в паровую машину, $t_1 = 127\text{ }^\circ\text{C}$; температура в конденсаторе $t_2 = 27\text{ }^\circ\text{C}$. Определить теоретически максимальную работу при затрате количества теплоты $Q_1 = 4,2\text{ кДж}$.

3.56 1 кмоль кислорода O_2 совершает цикл Карно в интервале температур от $27\text{ }^\circ\text{C}$ до $327\text{ }^\circ\text{C}$. Известно, что отношение максимального за цикл давления p_{\max} к минимальному давлению p_{\min} равно 20. Вычислить: КПД цикла η ; работу A , совершаемую газом за цикл.

3.57 Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в 4 раза выше температуры T_2 охладителя. Какую долю ω количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает охладителю?

3.58 Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в 3 раза выше температуры T_2 охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 42\text{ кДж}$. Какую работу A совершил газ?

3.59 Цикл, совершаемый двумя киломолями одноатомного идеального газа, состоит из изотермы, изобары и изохоры (рисунок 2). Известно, что максимальный объем газа в 2 раза больше минимального и изотермический процесс совершается при температуре $T = 400\text{ К}$. Вычислить работу A и КПД цикла η .

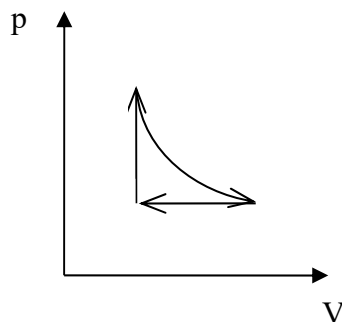


Рисунок 2

3.60 Тепловой двигатель работает по циклу, состоящему из изотермического, изобарного и адиабатного процессов. При изобарном процессе рабочее тело – идеальный газ – нагревается от температуры $T_1 = 200\text{ К}$ до $T_2 = 500\text{ К}$. Определить коэффициент полезного действия данного теплового двигателя и двигателя, работающего по циклу Карно, происходящему между максимальной и минимальной температурами данного цикла.

Энтропия.

3.61 Найти изменение энтропии при превращении $m = 10\text{ г}$ льда при $t_1 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ в пар при $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$.

3.62 Найти прирост энтропии при превращении $m = 1\text{ г}$ воды при $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ в пар при $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$.

3.63 10 г кислорода нагревается от $t_1 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 150\text{ }^\circ\text{C}$. Найти изменение энтропии, если нагревание происходит: изохорически; изобарически.

3.64 640 г расплавленного свинца при температуре плавления вылили на лед при $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$. Найти изменение энтропии при этом процессе.

3.65 Найти изменение энтропии при переходе $m = 8$ г кислорода от объема $V_1 = 10$ л при температуре $t_1 = 80$ °С к объему $V_2 = 40$ л при температуре $t_2 = 300$ °С.

3.66 Найти изменение энтропии при переходе $m = 6$ г водорода от объема $V_1 = 20$ л под давлением $p_1 = 1,5 \cdot 10^5$ Н/м² к объему $V_2 = 60$ л под давлением $p_2 = 1 \cdot 10^5$ Н/м².

3.67 Водород массой $m = 6,6$ г расширяется изобарически до удвоения объема. Найти изменение энтропии при этом расширении.

3.68 Найти изменение энтропии при изобарическом расширении гелия массой $m = 8$ г от объема $V_1 = 10$ л до $V_2 = 25$ л.

3.69 Масса $m = 10,5$ г азота изотермически расширяется от объема $V_1 = 2$ л до $V_2 = 5$ л. Найти прирост энтропии в этом процессе.

3.70 В результате нагревания $m = 22$ г азота его абсолютная температура увеличилась в 1,2 раза, а энтропия – на 4,19 Дж/К. При каких условиях производилось нагревание (при постоянном объеме или при постоянном давлении)?

Реальные газы.

3.71 Какую температуру имеет масса $m = 2$ г азота, занимающего объем $V = 820$ см³ при давлении $p = 0,2$ МПа? Газ рассматривать как: идеальный; реальный.

3.72 В закрытом сосуде объемом $V = 0,5$ м³ находится 0,6 кмоль углекислого газа при давлении $p = 3$ МПа. Пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса, найти, во сколько раз надо увеличить температуру газа, чтобы давление увеличилось вдвое.

3.73 Найти давление, обусловленное силами взаимодействия молекул, заключенных в 1 кмоль газа при нормальных условиях. Критическая температура и критическое давление этого газа $T_k = 417$ К и $p_k = 7,7$ МПа.

3.74 Во сколько раз давление газа больше его критического давления, если известно, что его объем и температура вдвое больше критических значений этих величин.

3.75 1 моль гелия занимает объем $V = 237$ м³ при температуре $t = -200$ °С. Найти давление газа, пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса.

3.76 В сосуде объемом $V = 10$ л находится $m = 0,25$ кг азота при температуре $t = 27$ °С. Какую часть давления газа составляет давление, обусловленное силами взаимодействия молекул? Какую часть объема сосуда составляет собственный объем молекул?

3.77 0,5 кмоль трехатомного газа адиабатически расширяется в вакуум от $V_1 = 0,5$ м³ до $V_2 = 3$ м³. Температура газа при этом понижается на 12,2 К. Найти постоянную a , входящую в уравнение Ван-дер-Ваальса.

3.78 20 кг азота адиабатически расширяется в вакуум от объема $V_1 = 1$ м³ до $V_2 = 2$ м³. Найти понижение температуры при этом расширении, считая известной для азота постоянную a , входящую в уравнение Ван-дер-Ваальса.

3.79 Найти коэффициент диффузии гелия при температуре $t = 17$ °С и давлении $p = 150$ кПа. Эффективный диаметр атома вычислить, считая известными для гелия критические значения T_k и p_k .

3.80 Гелий массой $m = 10$ г занимает объем $V = 100$ см³ при давлении $p = 100$ МПа. Найти температуру газа, считая его: идеальным; реальным.

Список литературы

- 1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учебное пособие / Т. И. Трофимова. – Москва : Высшая школа, 2017. – 560 с.
- 2 **Савельев, И. В.** Курс общей физики: учебное пособие: в 3 т. Т. 1: Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – 12-е изд., стер. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2016. – 432 с.
- 3 **Трофимова, Т. И.** Курс физики. Задачи и решения : учебное пособие / Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. – Москва : Академия, 2004. – 592 с.
- 4 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – Москва : Наука, 2003. – 328 с.
- 5 **Чертов, А. Г.** Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – Москва : Альянс, 2019. – 640 с.
- 6 **Сена, Л. А.** Единицы физических величин и их размерность / Л. А. Сена. – Москва : Наука, 1988. – 432 с.

Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Нормальное ускорение свободного падения около Земли	g	9,81 м/с ²
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг·с ²)
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Атомная единица массы	<i>а. е. м.</i>	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Таблица А.2 – Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м

Таблица А.3 – Плотность твердых тел

Твердое тело	Плотность, кг/м ³	Твердое тело	Плотность, кг/м ³
Алюминий	$2,70 \cdot 10^3$	Медь	$8,93 \cdot 10^3$
Барий	$3,50 \cdot 10^3$	Никель	$8,90 \cdot 10^3$
Ванадий	$6,02 \cdot 10^3$	Олово	$7,30 \cdot 10^3$
Висмут	$9,80 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Вольфрам	$19,35 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Железо	$7,88 \cdot 10^3$	Сталь	$7,60 \cdot 10^3$
Литий	$0,53 \cdot 10^3$	Цезий	$1,90 \cdot 10^3$
Лед (при $t = 0$ °С)	$0,92 \cdot 10^3$	Цинк	$7,15 \cdot 10^3$

Таблица А.4 – Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Жидкость	Плотность, кг/м ³
Вода (при 4 °С)	$1,00 \cdot 10^3$	Нефть	$0,94 \cdot 10^3$
Глицерин	$1,26 \cdot 10^3$	Сероуглерод	$1,26 \cdot 10^3$
Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$	Спирт	$0,80 \cdot 10^3$

Таблица А.5 – Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность, кг/м ³	Газ	Плотность, кг/м ³
Азот	1,25	Гелий	0,18
Аргон	1,78	Кислород	1,43
Водород	0,09	Криптон	3,73
Воздух	1,29	Неон	0,89

Таблица А.6 – Эффективный диаметр молекулы

Газ	Диаметр, м	Газ	Диаметр, м
Азот	$3,0 \cdot 10^{-10}$	Воздух	$3,7 \cdot 10^{-10}$
Аргон	$3,7 \cdot 10^{-10}$	Гелий	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Водород	$2,3 \cdot 10^{-10}$	Кислород	$2,7 \cdot 10^{-10}$
Водяной пар	$4,7 \cdot 10^{-10}$	Неон	$2,6 \cdot 10^{-10}$

Таблица А.7 – Удельная теплота парообразования воды

$t, ^\circ\text{C}$	0	50	100	200
$r, \text{МДж/кг}$	2,49	2,38	2,26	1,94

Таблица А.8 – Удельная теплота плавления некоторых твердых тел

Вещество	Удельная теплота плавления, кДж/кг
Алюминий	322
Железо	272
Лед	335
Медь	176
Свинец	24,3

Таблица А.9 – Удельная теплоемкость некоторых жидкостей (при 20 °С)

Вещество	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Бензол	1720
Вода	4190
Глицерин	2430
Касторовое масло	1800
Керосин	2140
Ртуть	138
Спирт	2510

Таблица А.10 – Относительные атомные массы (округленные значения) A_r и порядковые номера Z некоторых элементов

Элемент	Символ	A_r	Z	Элемент	Символ	A_r	Z
Азот	N	14	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	13	Медь	Cu	64	29
Аргон	Ar	40	18	Молибден	Mo	96	42
Барий	Ba	137	56	Натрий	Na	23	11
Ванадий	V	60	23	Неон	Ne	20	10
Водород	H	1	1	Никель	Ni	59	28
Вольфрам	W	184	74	Олово	Sn	119	50
Гелий	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Железо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сера	S	32	16
Калий	K	39	19	Серебро	Ag	108	47
Кальций	Ca	40	20	Углерод	C	12	6
Кислород	O	16	8	Уран	U	238	92
Магний	Mg	24	12	Хлор	Cl	35	17

Таблица А.11 – Массы покоя некоторых частиц

Частица	m_0	
	кг	<i>a. e. m.</i>
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867
β -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149

Таблица А.12 – Критические параметры и поправки Ван-дер-Ваальса

Газ	Критическая температура $T_{кр}, K$	Критическое давление $p_{кр}, MPa$	Поправки Ван-дер-Ваальса	
			$a, H \cdot m^4 / \text{моль}^2$	$b, 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Азот	126	3,39	0,135	3,86
Аргон	151	4,86	0,134	3,22
Водяной пар	647	22,1	0,545	3,04
Кислород	155	5,08	0,136	3,17
Неон	44,4	2,72	0,209	1,70
Углекислый газ	304	7,38	0,361	4,28
Хлор	417	7,71	0,650	5,62