

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра физики и энергоэффективных технологий

Е. И. ДОЦЕНКО, И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, К. П. ШИЛЯЕВА

**МЕХАНИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Пособие

Гомель 2022

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики и энергоэффективных технологий

Е. И. ДОЦЕНКО, И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, К. П. ШИЛЯЕВА

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности
для обучающихся по специальности*

*1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном
транспорте»,
в качестве пособия по учебной дисциплине «Физика»*

Гомель 2022

УДК 531(075.8)
ББК 22.2
Д29

Рецензенты: кафедра общей физики ГГУ им. Ф. Скорины (зав. кафедрой – канд. техн. наук, доцент *Е. Б. Шершнев*); профессор кафедры вагонов д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов* (БелГУТ)

Доценко, Е. И.
Д29 Механика. Молекулярная физика. Электричество : пособие / Е. И. Доценко, И. О. Деликатная, К. П. Шиялева ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 97 с.
ISBN 978-985-554-994-0

Приведены вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы, основная и дополнительная литература, сведения из теории, задачи для самостоятельной работы и справочные таблицы по разделам программы курса физики.

Предназначено для методического обеспечения практических занятий и самостоятельной работы по физике студентов инженерно-технических специальностей дневной формы обучения.

УДК 531(075.8)
ББК 22.2

ISBN 978-985-554-994-0

© Доценко Е.И., Деликатная И. О.,
Шиялева К. П., 2022
© Оформление. БелГУТ, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных условий успешного освоения курса физики является систематическое решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить законы и формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

При подготовке к практическим занятиям по изучаемой теме следует воспользоваться лекционным материалом, учебниками и методическими пособиями из списка рекомендуемой литературы, при решении практических заданий рекомендуется использовать некоторые физические постоянные и табличные данные, представленные в приложении.

Целью практических занятий является обобщение и закрепление имеющихся у студентов знаний по изучаемым темам.

Задачами практических занятий являются:

- контроль уровня усвоения студентами основных понятий и закономерностей по рассматриваемой теме;
- формирование умения применять полученные теоретические знания для решения задач;
- приобретение умения составлять таблицы при систематизации и обобщении знаний;
- формирование умения выделять признаки сходства в описании изучаемых явлений.

Контроль за подготовкой к практическим занятиям осуществляется устным и (или) письменным ответом на вопросы, а также выполнением тестовых заданий.

1 ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕМАТИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: механическое движение; механика как раздел физики; кинематика как раздел механики; материальная точка, система материальных точек; тело отсчета, система отсчета; кинематические уравнения движения точки; траектория; криволинейное и прямолинейное движения; длина пути; перемещение; поступательное движение.

Знать определение, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных) следующих физических величин: скорость; средняя скорость; мгновенная скорость; средняя путевая скорость; ускорение; среднее ускорение; мгновенное ускорение; тангенциальное ускорение; нормальное ускорение.

Уметь записать основные уравнения кинематики для равноускоренного поступательного движения.

Сведения из теории

Положение материальной точки в пространстве задается радиус-вектором \vec{r} :

$$\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z,$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы направлений (орты); x, y, z – координаты точки.

Кинематические уравнения движения (в координатной форме)

$$x = f_1(t); y = f_2(t); z = f_3(t),$$

где t – время.

Средняя скорость движения

$$\langle \vec{v} \rangle = \Delta \vec{r} / \Delta t,$$

где $\Delta \vec{r} = (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$ – перемещение материальной точки в интервале времени $\Delta t = (t_2 - t_1)$.

Средняя путевая скорость

$$\langle v_n \rangle = \Delta s / \Delta t,$$

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

Мгновенная скорость

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{i}v_x + \vec{j}v_y + \vec{k}v_z,$$

где $v_x = dx/dt$; $v_y = dy/dt$; $v_z = dz/dt$ – проекции скорости \vec{v} на оси координат.

Абсолютная величина скорости

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

Ускорение

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z,$$

где $a_x = dx/dt$; $a_y = dy/dt$; $a_z = dz/dt$ – проекции ускорения \vec{a} на оси координат.

Абсолютная величина ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

При произвольном (криволинейном) движении ускорение можно представить как сумму нормального \vec{a}_n и тангенциального \vec{a}_τ ускорений:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau.$$

Абсолютная величина этих ускорений

$$a_n = v^2 / R, \quad a_\tau = dv/dt, \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2},$$

где R – радиус кривизны в данной точке траектории.

Классификация движения в соответствии с параметрами a_τ и a_n :

- 1) $a_\tau = 0, a_n = 0$ – прямолинейное равномерное движение;
- 2) $a_\tau = a = \text{const}, a_n = 0$ – прямолинейное равнопеременное движение.

При таком виде движения

$$a_\tau = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}.$$

Если начальный момент времени $t_1 = 0$, а начальная скорость $v_1 = v_0$, то $v = v_0 + at$, а длина пути, пройденного точкой, в этом случае

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2};$$

3) $a_\tau = f(t), a_n = 0$ – прямолинейное движение с переменным ускорением;

4) $a_\tau = 0, a_n = \text{const}$. При $a_\tau = 0$ скорость изменяется только по направлению. Из формулы $a_n = v^2/r$ следует, что радиус кривизны должен быть постоянным. Следовательно, движение по окружности является равномерным;

5) $a_\tau = 0, a_n \neq 0$ – равномерное криволинейное движение;

6) $a_\tau = \text{const}, a_n \neq 0$ – криволинейное равнопеременное движение;

7) $a_\tau = f(t), a_n \neq 0$ – криволинейное движение с переменным ускорением.

Кинематические уравнения движения материальной точки вдоль оси X :

а) при равномерном движении –

$$x = x_0 + vt, \quad v = \text{const}, \quad a_x = 0;$$

б) при равнопеременном движении –

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{a_0 t^2}{2}, \quad v_0 = v_0 + a_0 t, \quad a_0 = \text{const}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Радиус-вектор материальной точки изменяется со временем по закону $\vec{r} = t^3 \vec{i} + 3t^2 \vec{j}$, где \vec{i}, \vec{j} – орты осей X и Y . Определите: скорость \vec{v} ; ускорение \vec{a} ; модуль скорости и модуль ускорения в момент времени $t = 1$ с.

2 Уравнение $x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($A = 6$ м; $B = 3$ м/с; $C = 0,2$ м/с²; $D = 0,1$ м/с³) задает движение материальной точки. Определите время после начала движения, когда ускорение a тела станет равным $2,8$ м/с². Определите координату и скорость тела в этот момент времени.

3 Нормальное ускорение точки, движущейся по окружности радиусом $R = 4$ м, задается уравнением $a_n = A + Bt + Ct^2$ ($A = 1$ м/с²; $B = 6$ м/с³; $C = 9$ м/с⁴). Определите: тангенциальное ускорение точки a_τ ; путь s , пройденный точкой за время $t_1 = 5$ с после начала движения; полное ускорение a для момента времени $t_2 = 1$ с.

4 Тело брошено горизонтально со скоростью $v_0 = 15$ м/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определить: нормальное ускорение a_n ; тангенциальное ускорение a_τ ; радиус кривизны траектории тела R через $t = 2$ с после начала движения.

5 Тело брошено со скоростью $v_0 = 15$ м/с под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите: высоту подъема тела H ; дальность горизонтального полета тела s ; время движения тела t .

6 Тело брошено под углом α к горизонту. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите этот угол, если максимальная высота подъема меньше дальности полета в 4 раза.

7 Тело брошено со скоростью $v_0 = 20$ м/с под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите для момента времени $t = 1,5$ с после начала движения: нормальное ускорение a_n ; тангенциальное ускорение a_t ; полное ускорение тела a .

8 За шестую секунду движения тело прошло путь 22 м. Найти путь S , пройденный телом за шесть секунд от начала движения. Начальная скорость тела равна нулю.

9 Тело движется прямолинейно с ускорением 4 м/с². Его начальная скорость равна 14 м/с. Какой путь S пройдет тело за третью секунду равноускоренного движения.

10 Тело, которое падало без начальной скорости с некоторой высоты, за последние две секунды движения прошло путь 60 м. Определите высоту H , с которой падало тело.

11 Тело, брошенное с некоторой высоты, за последние три секунды движения прошло путь 105 м. Найти высоту H , с которой падало тело, если модуль начальной скорости тела равен 10 м/с.

12 Тело движется равноускоренно с начальной скоростью v_0 . Определите ускорение тела, если за время $t = 2$ с оно прошло путь 16 м и к этому моменту времени его скорость $v = 3v_0$.

13 Камень брошен вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. По истечении какого времени t камень будет находиться на высоте $h = 15$ м?

14 Тело, брошенное вертикально вверх, находилось на одной и той же высоте $8,6$ м с интервалом времени 3 с. Вычислить начальную скорость v_0 брошенного тела.

Контрольные вопросы

- 1 Что называется материальной точкой? Почему в механике вводят такую модель?
- 2 Что такое система отсчета?
- 3 Что такое вектор перемещения? Всегда ли модуль вектора перемещения равен отрезку пути, пройденному точкой?
- 4 Какое движение называется поступательным?
- 5 Дайте определения векторов средней скорости и среднего ускорения, мгновенной скорости и мгновенного ускорения. Каковы их направления?
- 6 Что характеризует тангенциальная составляющая ускорения? Нормальная составляющая ускорения? Каковы их модули? Как они направлены?
- 7 Возможны ли движения, при которых отсутствует нормальное ускорение? Тангенциальное ускорение? Приведите примеры.

2 ЭЛЕМЕНТЫ ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: динамика как раздел механики; основная задача динамики (прямая и обратная); абсолютно твердое тело; инерция; инерциальные и неинерциальные системы отсчета; принцип сложения сил; принцип независимости сил; деформация, деформация упругая и пластическая; деформация сдвига; деформация кручения; деформация изгиба; внешнее трение, внутреннее трение; невесомость, перегрузка.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин): масса; сила, результирующая сила; сила тяжести; вес тела; сила упругости; напряжение; относительная деформация; модуль Юнга; предел пропорциональности; предел упругости; предел прочности; предел текучести; поступательная сила инерции; центробежная сила инерции; сила Кориолиса.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: I закон Ньютона; II закон Ньютона; III закон Ньютона; закон Гука; закон Амонтона – Кулона; закон трения качения; закон всемирного тяготения.

Уметь записать уравнение динамики материальной точки.

Сведения из теории

Первый закон Ньютона

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0,$$

где $\sum \vec{F}_i$ – векторная сумма всех n сил, действующих на тело; \vec{F}_i – i -я сила, являющаяся одной из этих сил от первой до n -й, при $v = \text{const}$ или $a = 0$.

Второй закон Ньютона (основное уравнение динамики материальной точки)

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt},$$

где \vec{a} – ускорение; m – масса; \vec{p} – импульс.

Уравнение динамики материальной точки (второй закон Ньютона):

1) в векторной форме –

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad \text{или} \quad m\vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i,$$

где $\sum \vec{F}_i$ – геометрическая сумма сил, действующих на материальную точку; $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс;

2) в координатной (скалярной) форме –

$$ma_x = \sum F_{i,x}, \quad ma_y = \sum F_{i,y}, \quad ma_z = \sum F_{i,z}.$$

Третий закон Ньютона

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Знак « \leftrightarrow » в этом уравнении указывает на противоположную направленность векторов сил.

Упругое напряжение:

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где F – модуль силы упругости, направленной по нормали к поверхности, действующей на единицу площади S поперечного сечения тела.

Относительное изменение длины стержня (продольная деформация)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

Для малых деформаций

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где коэффициент пропорциональности E называется модулем Юнга.

Сила упругости

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k – коэффициент упругости (жесткость); x – абсолютная деформация.

Сила трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения скольжения; N – сила нормального давления.

Сила трения качения определяется по закону, установленному Кулоном:

$$F_{\text{тр}} = f_k \frac{N}{r},$$

где f_k – коэффициент трения качения, имеющий размерность длины; r – радиус катящегося тела.

Сила гравитационного взаимодействия

$$F_{\text{гп}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где G – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел, рассматриваемых как материальные точки; r – расстояние между ними.

Сила тяжести

$$\vec{P} = m\vec{g},$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения.

Если тело расположено на высоте h от поверхности Земли, тогда

$$P = G \frac{mM}{(R_0 + h)^2},$$

где m – масса тела; M – масса Земли; R_0 – радиус Земли, то есть сила тяжести с удалением от поверхности Земли уменьшается.

Задачи для самостоятельного решения

1 К проволоке диаметром $d = 2$ мм подвешен груз массой $m = 1$ кг. Определить напряжение σ , возникающее в проволоке.

2 К стальному стержню длиной 3 м и диаметром 2 см подвешен груз массой 2,5 т. Определить напряжение σ в стержне; относительное удлинение стержня ε ; абсолютное удлинение стержня Δl .

3 К вертикальной проволоке длиной $l = 5$ м и площадью поперечного сечения $S = 2 \text{ мм}^2$ подвешен груз массой $m = 5,1$ кг. В результате проволока удлинилась на $\Delta l = 0,6$ мм. Найти модуль Юнга E материала проволоки.

4 Проволока длиной $l = 2$ м и диаметром $d = 1$ мм натянута горизонтально. Когда к середине проволоки подвесили груз массой $m = 1$ кг, проволока растянулась настолько, что точка подвеса опустилась на $h = 4$ см. Определить модуль Юнга E материала проволоки.

5 Свинцовая проволока подвешена в вертикальном положении за верхний конец. Какую наибольшую длину l может иметь проволока,

не обрываясь под действием силы тяжести? Предел прочности свинца $\sigma_{\text{пр}} = 12,3$ МПа.

6 Радиус Земли в $n = 3,66$ раза больше радиуса Луны; средняя плотность Земли в $k = 1,66$ раза больше средней плотности Луны. Определить ускорение свободного падения g_n на поверхности Луны, если на поверхности Земли ускорение свободного падения известно.

7 Радиус малой планеты $R = 250$ км, средняя плотность $\rho = 3$ г/см³. Определить ускорение свободного падения g на поверхности планеты.

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

9 Стационарный искусственный спутник движется по окружности в плоскости земного экватора, оставаясь над одним и тем же пунктом земной поверхности. Определить угловую скорость ω спутника; радиус R его орбиты.

10 К нити подвешен груз массой $m = 500$ г. Найти силу натяжения нити T , если нить с грузом: 1) поднимается с ускорением $a = 2$ м/с²; 2) опускается с тем же ускорением.

11 Тело равномерно скользит по наклонной плоскости, угол наклона которой 30° . Определить коэффициент трения μ тела о плоскость.

12 По наклонной плоскости с углом наклона 30° скользит тело. Определите скорость тела v в конце второй секунды от начала скольжения, если коэффициент трения равен 0,15.

13 Тело массой 673 г начинает двигаться с ускорением 1 м/с² по горизонтальной поверхности под действием силы F , образующей с горизонтом угол 60° . Определить модуль этой силы, если коэффициент трения равен 0,2.

14 Грузы одинаковой массы $m_1 = m_2 = 0,5$ кг соединены нитью и перекинуты через невесомый блок, укрепленный на конце стола. Коэффициент трения груза о стол равен 0,15. Пренебрегая трением в блоке, определите: ускорение a с которым движутся грузы; силу натяжения нити T .

15 Материальная точка массой $m_2 = 2$ кг движется под действием силы F согласно уравнению $x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($A = 6$ м; $B = 3$ м/с; $C = 1$ м/с²; $D = -0,2$ м/с³). Найти значение этой силы в моменты времени $t_1 = 2$ с и $t_2 = 5$ с. В какой момент времени сила равна нулю?

16 Гирька, привязанная к нити длиной 30 см, описывает в горизонтальной плоскости окружность радиусом 15 см. Какому числу оборотов в минуту соответствует скорость вращения гирьки?

17 Самолет, летящий со скоростью 900 км/ч, описывает петлю Нестерова. Каков должен быть радиус петли, чтобы наибольшая сила, прижимающая летчика к сидению, была равна пятикратному весу летчика.

18 На горизонтально вращающейся платформе на расстоянии $R = 50$ см от оси вращения лежит груз. При какой частоте вращения платформы груз начнет скользить? Коэффициент трения между грузом и платформой $\mu = 0,05$.

19 Автомобиль массой 1 т едет по выпуклому мосту с радиусом кривизны 340 м со скоростью 108 км/ч. Найти силу давления F на мост в точке, направление на которую из центра кривизны моста составляет 30° с вертикалью.

20 Вагон катится вдоль горизонтального участка дороги. Сила трения составляет 20 % от веса вагона. К потолку вагона на нити подвешен шарик массой 10 г. Определите силу F , действующую на нить и угол отклонения α нити от вертикали.

Контрольные вопросы

1 Какая система отсчета называется инерциальной? Почему система отсчета, связанная с Землей, неинерциальна?

2 Что такое сила? Как ее можно охарактеризовать?

3 Является ли первый закон Ньютона следствием второго закона Ньютона? Почему?

4 В чем заключается принцип независимости действия сил?

5 Какова физическая сущность трения? В чем отличие сухого трения от жидкого? Какие виды внешнего (сухого) трения вы знаете?

6 Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?

7 Дайте объяснение диаграммы напряжений. Что такое пределы пропорциональности, упругости и прочности?

8 Каков физический смысл модуля Юнга?

9 Что такое вес тела? В чем отличие веса тела от силы тяжести?

10 Как объяснить возникновение невесомости при свободном падении?

11 Какие траектории движения имеют спутники, получившие первую и вторую космические скорости?

12 Как вычисляются первая и вторая космические скорости?

13 Что такое силы инерции? Чем они отличаются от сил, действующих в инерциальных системах отсчета? Когда и почему необходимо рассматривать силы инерции?

14 Как направлены поступательная сила инерции, центробежная сила инерции и сила Кориолиса? Когда они проявляются?

15 В Северном полушарии производится выстрел вдоль меридиана на север. Как скажется на движении снаряда суточное вращение Земли?

16 Сформулируйте и поясните принцип эквивалентности Эйнштейна.

3 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: механическая система; внешние силы и внутренние силы; замкнутая система; однородность пространства; упругий и неупругий удар; реактивное движение.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин): импульс; главный вектор внешних сил; полный импульс механической системы; коэффициент восстановления для соударяющихся тел; реактивная сила; центр масс механической системы.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон движения центра масс; закон сохранения импульса.

Уметь записать уравнения движения тела переменной массы (уравнение Мещерского) и формулу Циолковского.

Сведения из теории

Закон сохранения импульса

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i = \text{const} \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const},$$

где n – число материальных точек (тел), входящих в систему.

Радиус-вектор центра масс (или центра инерции) системы материальных точек

$$r_C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i, \quad m = \sum_{i=1}^n m_i,$$

где m_i и \vec{r}_i – соответственно масса и радиус-вектор i -й материальной точки; n – число материальных точек в системе; m – масса системы.

Координаты центра масс системы материальных точек:

$$x_C = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad y_C = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \quad z_C = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i},$$

где m_i – масса i -й материальной точки; x_i, y_i, z_i – ее координаты.

Скорость центра масс

$$v_C = \frac{dr_C}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i .$$

Учитывая, что $\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$, а $\sum \vec{p}_i$ есть импульс \vec{p} системы, можно записать

$$\vec{p} = m \vec{v}_C ,$$

т. е. импульс системы равен произведению массы системы на скорость ее центра масс.

Закон движения центра масс

$$m \frac{d\vec{v}_C}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n .$$

Коэффициент восстановления соударяющихся тел

$$\varepsilon = \frac{v'_n}{v_n} ,$$

где v_n и v'_n – нормальные составляющие относительной скорости тел до и после удара.

Если для сталкивающихся тел $\varepsilon = 0$, то такие тела называются абсолютно неупругими, если $\varepsilon = 1$ – абсолютно упругими.

Для абсолютно упругого удара выполняются закон сохранения импульса

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

и закон сохранения кинетической энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} ,$$

где m_1 и m_2 – массы соударяющихся тел; \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – скорости тел до удара, \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 – после удара.

Закон сохранения импульса для абсолютно неупругого удара

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v} ,$$

где v – скорость движения шаров после удара.

Уравнение движения тела переменной массы

$$m \vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_p , \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} , \quad \vec{F}_p = -\vec{u} \frac{dm}{dt} ,$$

где m – масса ракеты; a – ускорение ракеты; v – скорость ракеты; F_p – реактивная сила; u – скорость истечения газов относительно ракеты.

Если вектор \vec{u} противоположен \vec{v} по направлению, то ракета ускоряется, а если совпадает – тормозится.

Формула Циолковского

$$v = u \ln \frac{m_0}{m},$$

где m_0 – стартовая масса ракеты.

Задачи для самостоятельного решения

1 Шар массой $m_1 = 10$ кг, движущийся со скоростью $v_1 = 4$ м, сталкивается с шаром массой $m_2 = 4$ кг, который движется со скоростью $v_2 = 12$ м/с. Считая удар прямым, неупругим, найти скорость шаров u после удара и кинетические энергии шаров до и после удара. Решить задачу в двух случаях 1) малый шар нагоняет большой шар, движущийся в том же направлении; 2) шары движутся навстречу друг другу.

2 Движущееся тело массой m_1 ударяется о неподвижное тело массой m_2 . Считая удар упругим и центральным, найти, какую часть своей первоначальной кинетической энергии первое тело передает второму при ударе? Задачу решить сначала в общем виде, а затем рассмотреть случаи: 1) $m_1 = m_2$; 2) $m_1 = 9m_2$.

3 Снаряд массой $m = 5$ кг, вылетевший из орудия, в верхней точке траектории имеет скорость $v = 300$ м/с. В этой точке он разорвался на два осколка, причем больший осколок массой $m_1 = 3$ кг полетел в обратном направлении со скоростью $v_1 = 100$ м/с. Определите скорость v_2 второго, меньшего осколка.

4 Снаряд, вылетевший из орудия со скоростью v_0 , разрывается на два одинаковых осколка в верхней точке траектории на расстоянии l (по горизонтали). Один из осколков полетел в обратном направлении со скоростью движения снаряда до разрыва. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите, на каком расстоянии s (по горизонтали) от орудия упадет второй осколок.

5 Снаряд, летящий со скоростью 12 м/с, в верхней точке траектории разорвался на две части массами 10 и 15 кг. Скорость большего осколка составляет 25 м/с и направлена под углом 30° к горизонту вниз и вперед. Определите модуль скорости v меньшего осколка.

6 На железнодорожной платформе, движущейся по инерции со скоростью $v_0 = 3$ км/ч, укреплено орудие. Масса платформы с орудием $M = 10$ т. Ствол орудия направлен в сторону движения платформы. Снаряд массой $m = 10$ кг вылетает из ствола под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Определить скорость v снаряда (относительно Земли), если после выстрела скорость платформы уменьшилась в 2 раза.

7 Платформа с песком общей массой $M = 2$ т стоит на рельсах на горизонтальном участке пути. В песок попадает снаряд массой $m = 8$ кг и застревает в нем. Пренебрегая трением, определите, с какой скоростью u будет двигаться платформа, если в момент попадания скорость снаряда $v = 450$ м/с, а ее направление – сверху вниз под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту.

8 Определите положение центра масс системы, состоящей из четырех шаров, массы которых равны соответственно m , $2m$, $3m$ и $4m$, в следующих случаях: 1) шары лежат на одной прямой; 2) шары расположены по вершинам квадрата; 3) шары расположены по четырем смежным вершинам куба. Во всех случаях расстояние между соседними шарами равно 15 см, шар массой m находится в начале координат.

9 На катере массой $m = 4,5$ т находится водомет, выбрасывающий со скоростью $u = 6$ м/с относительно катера назад 25 кг/с воды. Пренебрегая сопротивлением движению катера, определите: 1) скорость катера через $t = 3$ мин после начала движения; 2) предельно возможную скорость катера.

10 Ракета, масса которой в начальный момент времени $m_0 = 2$ кг, запущена вертикально вверх. Относительная скорость выхода продуктов сгорания $u = 150$ м/с, расход горючего $\mu = 0,2$ кг/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите ускорение a ракеты через $t = 3$ с после начала её движения.

11 Ракета с начальной массой $m_0 = 300$ г, начинает выбрасывать продукты сгорания с относительной скоростью $u = 200$ м/с. Расход горючего $\mu = 0,21$ кг/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите за какой промежуток времени t скорость ракеты станет равной $v_1 = 50$ м/с; скорость v_2 , которой достигнет ракета, если масса заряда $m_0 = 0,2$ кг.

Контрольные вопросы

- 1 Что называется механической системой?
- 2 Какие системы являются замкнутыми? Является ли Вселенная замкнутой системой? Почему?

- 3 В чем заключается закон сохранения импульса?
- 4 В каких системах выполняется закон сохранения импульса? Почему он является фундаментальным законом природы?
- 5 Каким свойством пространства обуславливается справедливость закона сохранения импульса?
- 6 Что называется центром масс системы материальных точек? Как движется центр масс замкнутой системы?
- 7 Чем отличается абсолютно упругий удар от абсолютно неупругого?
- 8 Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара? Следствием каких законов являются эти выражения?
- 9 Какая сила называется реактивной? Чему она равна, как направлена?
- 10 Каким уравнением описывается движение тела переменной массы?
- 11 Что показывает формула Циолковского?

4 РАБОТА. ЭНЕРГИЯ. МОЩНОСТЬ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: энергия; работа силы; консервативные силы; диссипативные силы; кинетическая энергия; потенциальная энергия.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин): элементарная работа силы; мощность; кинетическая энергия механической системы; потенциальная энергия силового поля; потенциальная энергия упругодеформированного тела; потенциальная энергия гравитационного взаимодействия; полная механическая энергия системы.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: сохранения механической энергии; сохранения и превращения энергии; сохранения кинетической энергии для упругого удара.

Уметь графически представить работу силы.

Сведения из теории

Работа силы:

а) постоянной – $A = F \Delta r \cos \alpha;$

б) переменной – $A = \int F(r) \cos \alpha dr,$

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

Мощность:

а) средняя – $\langle N \rangle = A / \Delta t$;

б) мгновенная – $N = dA / dt$ или $N = Fv \cos \alpha$.

Кинетическая энергия материальной точки (или тела, движущегося поступательно)

$$T = \frac{mv^2}{2}; \quad T = \frac{p^2}{2m}.$$

Кинетическая энергия системы из n материальных точек

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2},$$

где v_i – скорость i -й материальной точки массой m_i .

Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$\Pi = \frac{kx^2}{2}.$$

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

$$\Pi = -G \frac{m_1 m_2}{r}.$$

Закон сохранения энергии в механике (для замкнутых консервативных систем)

$$T + \Pi = \text{const.}$$

Сила, действующая на данное тело в данной точке поля, и потенциальная энергия связаны соотношением

$$\vec{F} = -\text{grad}\Pi \quad \text{или} \quad \vec{F} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \Pi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \Pi}{\partial z} \right).$$

Потенциальная энергия тела, находящегося в однородном поле силы тяжести,

$$\Pi = mgh,$$

где h – высота тела над уровнем, принятым на нулевой для отсчета потенциальной энергии. Эта формула справедлива при $h \ll R_3$ (R_3 – радиус Земли).

Задачи для самостоятельного решения

1 Тело массой 5 кг поднимают вертикально вверх с ускорением 2 м/с^2 . Определить работу силы тяги за первые 5 с движения.

2 Тело брошено вертикально вверх со скоростью 30 м/с. Определите высоту, на которой потенциальная энергия тела в 2 раза больше его кинетической энергии.

3 Тело массой $m_1 = 3 \text{ кг}$ движется со скоростью $v_1 = 2 \text{ м/с}$ и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Считая удар центральным и неупругим, определите количество теплоты, выделившееся при ударе.

4 С башни высотой $H = 20 \text{ м}$ горизонтально со скоростью $v_0 = 10 \text{ м/с}$ брошен камень массой $m = 400 \text{ г}$. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определите для момента времени $t = 1 \text{ с}$ после начала движения: 1) кинетическую энергию камня; 2) его потенциальную энергию.

5 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. Определите: 1) во сколько раз масса первого тела больше массы второго тела; 2) кинетическую энергию второго тела непосредственно после удара, если первоначальная кинетическая энергия первого тела равна 800 Дж.

6 Материальная точка массой $m = 1 \text{ кг}$ двигалась под действием некоторой силы согласно уравнению $s = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$ ($A = 6 \text{ м}$; $B = 3 \text{ м/с}$; $C = 5 \text{ м/с}^2$; $D = 1 \text{ м/с}^3$). Определить мощность, затрачиваемую на движение точки в момент времени $t = 1 \text{ с}$.

7 Пуля массой $m = 15 \text{ г}$, летящая горизонтально со скоростью $v = 200 \text{ м/с}$, попадает в баллистический маятник длиной $l = 1 \text{ м}$ и массой $M = 1,5 \text{ кг}$ и застревает в нем. Определите угол отклонения φ маятника.

8 Два шара массой $m_1 = 9 \text{ кг}$ и $m_2 = 12 \text{ кг}$ подвешены на нити длиной $l = 1,5 \text{ м}$. Первоначально шары соприкасаются между собой, затем меньший шар отклонили на угол $\alpha = 30^\circ$ и отпустили. Считая удар неупругим, определите высоту h , на которую поднимутся оба шара после удара.

9 Два шара массой $m_1 = 200 \text{ г}$ и $m_2 = 400 \text{ г}$ подвешены на нити длиной $l = 67,5 \text{ см}$. Первоначально шары соприкасаются между собой, затем меньший шар отклонили на угол $\alpha = 60^\circ$ и отпустили. Считая удар упругим, определите высоту h , на которую поднимется второй шар после удара.

10 Тело массой $m = 0,4$ кг скользит с наклонной плоскости высотой $h = 10$ см и длиной $l = 1$ м. Коэффициент трения на всем пути $\mu = 0,04$. Определите: 1) кинетическую энергию тела у основания плоскости; 2) путь, пройденный телом на горизонтальном участке до остановки.

11 Материальная точка массой $m = 20$ г движется по окружности радиусом $R = 10$ см с постоянным тангенциальным ускорением. К концу пятого оборота после начала движения кинетическая энергия материальной точки оказалась равной $6,3$ мДж. Определите тангенциальное ускорение.

12 С вершины идеальной гладкой сферы радиусом $R = 1,2$ м соскальзывает небольшое тело. Определите высоту h (от вершины сферы), с которой тело со сферы сорвется.

13 Пренебрегая трением, определите наименьшую высоту h , с которой должна скатываться тележка с человеком по желобу, переходящему в петлю радиусом $R = 6$ м, чтобы не оторваться от него в верхней точке петли.

14 Пружина жесткостью $k = 10$ кН/м сжата силой $F = 200$ Н. Определить работу внешней силы, дополнительно сжимающей эту пружинку ещё на 1 см.

15 Пружина жесткостью $k = 1$ кН/м была сжата на 4 см. Какую работу нужно совершить, чтобы сжатие пружины увеличить до 18 см.

16 Стальной стержень длиной $l = 2$ м и площадью поперечного сечения $S = 2$ см² растягивается силой $F = 10$ кН. Найти потенциальную энергию растянутого стержня.

Контрольные вопросы

- 1 В чем различие между понятиями энергии и работы?
- 2 Как найти работу переменной силы?
- 3 Какую работу совершает равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равномерно движущемуся по окружности?
- 4 Что такое мощность? Выведите ее формулу.
- 5 Дайте определения и выведите формулы для известных видов механической энергии.
- 6 Какова связь между силой и потенциальной энергией?
- 7 Чем обусловлено изменение потенциальной энергии?
- 8 Необходимо ли условие замкнутости системы для выполнения закона сохранения механической энергии?
- 9 В чем заключается закон сохранения механической энергии? Для каких систем он выполняется?

10 В чем физическая сущность закона сохранения и превращения энергии? Почему он является фундаментальным законом природы?

11 Чем отличается абсолютно упругий удар от абсолютно неупругого?

12 Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара? Следствием каких законов являются эти выражения?

5 ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕМАТИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: вращательное движение.

Знать определение, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных) следующих физических величин: период вращения; частота вращения; угол поворота; средняя угловая скорость; мгновенная угловая скорость; среднее угловое ускорение; мгновенное угловое ускорение.

Знать связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими движение материальной точки, принадлежащей вращающемуся телу.

Уметь записать основные уравнения кинематики для равноускоренного вращательного движения.

Уметь записать формулы, связывающие кинематические величины, характеризующие вращательное движение.

Сведения из теории

При вращательном движении положение твердого тела определяется углом поворота (угловым перемещением) $\Delta\vec{\varphi}$. Кинематическое уравнение вращательного движения в общем виде

$$\Delta\vec{\varphi} = f(t).$$

Средняя угловая скорость

$$\langle \omega \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t},$$

где $\Delta\varphi$ – изменение угла поворота за интервал времени Δt .

Мгновенная угловая скорость

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

Мгновенное угловое ускорение

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

Кинематическое уравнение вращения тела относительно оси Z :

1) при равномерном вращении –

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t, \quad \omega = \text{const}, \quad \varepsilon = 0;$$

2) при равнопеременном вращении –

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad \omega = \omega_0 + \varepsilon t, \quad \varepsilon = \text{const}.$$

Равномерное вращение также характеризуется периодом T и частотой вращения n :

$$T = \frac{t}{N} = \frac{2\pi}{\omega}, \quad n = \frac{1}{T},$$

где N – число оборотов, совершаемых телом за время t .

Связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими движение материальной точки, принадлежащей вращающемуся телу:

– длина пути, пройденного точкой по дуге окружности радиусом R при повороте тела на угол φ ,

$$s = \varphi R;$$

– линейная скорость точки

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \vec{R}], \quad v = \omega R;$$

– тангенциальное ускорение точки

$$\vec{a}_\tau = [\vec{\varepsilon} \vec{R}], \quad a_\tau = \varepsilon R;$$

– нормальное ускорение точки

$$\vec{a}_n = -\omega^2 \vec{R}, \quad a_n = \omega^2 R.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Якорь электродвигателя, имеющий частоту вращения $n = 50 \text{ с}^{-1}$, после выключения тока, сделав $N = 628$ оборотов, остановился. Определить угловое ускорение ε якоря.

2 Колесо автомашины вращается равнозамедленно. За время $t = 2$ мин оно изменило частоту вращения от 240 до 60 мин^{-1} . Определите: угловое ускорение колеса ε ; число полных оборотов N , сделанных колесом за это время.

3 Колесо радиусом $R = 50$ см вращается с постоянным угловым ускорением $\varepsilon = 1 \text{ рад/с}^2$. Найти для точек на ободе колеса полное ускорение a , приобретаемое к концу второй секунды после начала движения.

4 Точка движется по окружности радиусом $R = 15$ м с постоянным тангенциальным ускорением a_τ . К концу четвертого оборота после начала движения линейная скорость точки $v_1 = 15$ см/с. Определите нормальное ускорение a_n точки через $t_2 = 16$ с после начала движения.

5 Нормальное ускорение точки, движущейся по окружности радиусом $R = 4$ м, задается уравнением $a_n = A + Bt + Ct^2$ ($A = 1$ м/с²; $B = 6$ м/с³; $C = 9$ м/с⁴). Определите: тангенциальное ускорение точки a_τ ; путь s , пройденный точкой за время $t_1 = 5$ с после начала движения; полное ускорение a для момента времени $t_2 = 1$ с.

6 Материальная точка движется по окружности радиусом $R = 1,5$ м. Уравнение движения точки $\varphi = At + Bt^3$, где $A = 0,4$ рад/с, $B = 0,1$ рад/с³. Определите тангенциальное a_τ , нормальное a_n и полное a ускорения точки в момент времени $t = 3$ с.

7 Диск вращается согласно уравнению $\varphi = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($A = 3$ рад; $B = 1$ рад/с; $C = 1$ рад/с²; $D = 1$ рад/с³). Радиус диска $R = 10$ см. Определите тангенциальное a_τ , нормальное a_n и полное a ускорения точек на окружности диска для момента времени $t = 2$ с.

8 Диск вращается вокруг неподвижной оси так, что зависимость угла поворота радиуса диска от времени задается уравнением $\varphi = At^2$ ($A = 0,5$ рад/с²). Определите к концу второй секунды после начала движения: 1) угловую скорость диска ω ; 2) угловое ускорение диска ϵ ; 3) для точки, находящейся на расстоянии 80 см от оси вращения, тангенциальное a_τ , нормальное a_n и полное a ускорения.

9 Диск радиусом $R = 10$ см вращается так, что зависимость линейной скорости, лежащей на ободе диска, от времени задается уравнением $v = At + Bt^2$ ($A = 0,3$ м/с²; $B = 0,1$ м/с³). Определите момент времени, для которого вектор полного ускорения образует с радиусом колеса угол $\varphi = 4^\circ$.

10. Поезд движется по закруглению радиусом $R = 200$ м и зависимость его координаты от времени имеет вид $x = At^3$, где $A = 5$ см/с³. Определите полное a ускорение поезда в момент, когда его скорость $v = 36$ км/ч.

Контрольные вопросы

- 1 Записать кинематическое уравнение движения в общем векторном виде.
- 2 Как определить направление вектора углового перемещения?
- 3 Что характеризует величина угловой скорости?
- 4 Дать определение, записать формулу, указать направление средней и мгновенной угловой скорости.
- 5 Что характеризует величина углового ускорения?

6 Дать определение, записать формулу, указать направление среднего и мгновенного углового ускорения.

7 Записать кинематическое уравнение движения в скалярном виде.

8 Какова связь между линейными и угловыми величинами?

6 ЭЛЕМЕНТЫ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА. МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ ТЕЛ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: момент инерции тела; оси свободного вращения; главные оси инерции тела.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных физических величин): момент инерции материальной точки, системы (тела) относительно данной оси; кинетическая энергия вращающегося тела; момент силы относительно неподвижной точки; момент силы относительно неподвижной оси; плечо силы; момент импульса относительно неподвижной точки; моментом импульса относительно неподвижной оси.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон сохранения момента импульса.

Знать формулировку, уметь записать формулу теоремы Штейнера.

Уметь записать основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной точки, относительно неподвижной оси.

Сведения из теории

Момент инерции материальной точки

$$I = mr^2,$$

где m – масса точки; r – ее расстояние от оси вращения.

Момент инерции системы n материальных точек

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

Момент инерции твердого тела

$$I = \int r^2 dm.$$

Если тело однородно, т. е. его плотность ρ одинакова по всему объему, то

$$I = \rho \int r^2 dV.$$

Теорема Штейнера. Момент инерции тела относительно произвольной оси

$$I = I_0 + md^2,$$

где I_0 – момент инерции этого тела относительно оси, проходящей через центр инерции тела параллельно заданной оси; m – масса тела; d – расстояние между осями.

Моменты инерции некоторых тел:

$I = \frac{1}{12}ml^2$	Однородный тонкий стержень массой m и длиной l , ось проходит через центр тяжести перпендикулярно стержню
$I = \frac{1}{3}ml^2$	Однородный тонкий стержень массой m и длиной l , ось проходит через край стержня перпендикулярно центру
$I = mR^2$	Тонкое кольцо, обруч, полый цилиндр, труба радиусом R и массой m , ось проходит через центр перпендикулярно плоскости основания
$I = \frac{1}{2}mR^2$	Круглый однородный диск, цилиндр радиусом R и массой m , ось проходит через центр перпендикулярно плоскости основания
$I = \frac{2}{5}mR^2$	Однородный шар радиусом R и массой m , ось проходит через центр

Момент силы \vec{F} , действующей на тело, относительно неподвижной точки

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{F}], \quad M = rF \sin \alpha,$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из данной точки к точке приложения силы \vec{F} ; α – угол между векторами \vec{r} и \vec{F} .

Моментом силы относительно некоторой оси называют проекцию на эту ось вектора \vec{M} , определенного относительно произвольной точки этой оси. Момент силы, действующей на тело, относительно оси вращения

$$M = F_{\perp} l,$$

где F_{\perp} – проекция силы \vec{F} на плоскость, перпендикулярную оси вращения; l – плечо силы \vec{F} (кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы).

Момент импульса вращающейся точки относительно неподвижной точки

$$\vec{L} = [\vec{r} \vec{p}], \quad M = r p \sin \alpha,$$

где \vec{r} – радиус-вектор; $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс точки; α – угол между векторами \vec{r} и \vec{p} .

Моментом импульса относительно некоторой оси называют проекцию на эту ось вектора \vec{L} , определенного относительно произвольной точки этой оси. Если I – момент инерции тела относительно некоторой оси, то момент импульса тела относительно этой же оси

$$\vec{L} = I\vec{\omega},$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения тела.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси (ось вращения совпадает с главной осью инерции, проходящей через центр масс тела, $I = \text{const}$)

$$\vec{M} = I\vec{\epsilon},$$

где $\vec{\epsilon}$ – угловое ускорение тела.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной точки

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}.$$

Закон сохранения момента импульса

$$\sum_{i=1}^n \vec{L}_i = \text{const} \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n I_i \vec{\omega}_i = \text{const},$$

где L_i – момент импульса i -го тела, входящего в состав замкнутой системы, состоящей из n тел.

Закон сохранения момента импульса для двух взаимодействующих тел

$$I_1 \vec{\omega}_1 + I_2 \vec{\omega}_2 = I_1' \vec{\omega}_1' + I_2' \vec{\omega}_2',$$

где $I_1, I_2, \vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2$ – моменты инерции и угловые скорости тел до взаимодействия; $I_1', I_2', \vec{\omega}_1', \vec{\omega}_2'$ – те же величины после взаимодействия.

Элементарная работа при вращении вокруг неподвижной оси

$$dA = M d\varphi.$$

Работа постоянного момента силы M , действующего на вращающееся тело,

$$A = M\varphi,$$

где φ – угол поворота тела.

Мгновенная мощность, развиваемая при вращении тела,

$$N = M\omega.$$

Кинетическая энергия вращающегося тела

$$T = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Кинетическая энергия тела, катящегося по плоскости без скольжения (совершающего плоское движение),

$$T = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2},$$

где v – скорость центра инерции тела; первое слагаемое соответствует кинетической энергии поступательного движения тела, второе – кинетической энергии вращательного движения тела вокруг оси, проходящей через центр инерции.

Основные величины и уравнения, определяющие вращение тела вокруг неподвижной оси и его поступательное движение:

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	m	Момент инерции	J
Скорость	$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	Угловая скорость	$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$
Ускорение	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$
Сила	\vec{F}	Момент силы	M_z или \vec{M}
Импульс	$\vec{p} = m\vec{v}$	Момент импульса	$L_z = J_z\omega$
Основное уравнение динамики	$\vec{F} = m\vec{a}$	Основное уравнение динамики	$M_z = J_z\varepsilon$
	$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$		$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$
Работа	$dA = F_s ds$	Работа	$dA = M_z d\varphi$
Кинетическая энергия	$T = \frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия	$T = \frac{J_z\omega^2}{2}$

Задачи для самостоятельного решения

1 Определите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 50$ см и массой $m = 360$ г относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через: 1) конец стержня; 2) точку, отстоящую на $1/6$ его длины от конца стержня.

2 Определите момент инерции сплошного однородного диска радиусом $R = 40$ см и массой $m = 1$ кг относительно оси, проходящей через середину одного из радиусов перпендикулярно плоскости диска.

3 Шар радиусом $R = 10$ см и массой $m = 5$ кг вращается вокруг оси симметрии согласно уравнению $\varphi = A + Bt^2 + Ct^3$ ($A = 1$ рад, $B = 2$ рад/с²; $C = -0,5$ рад/с³). Определите момент сил для $t = 3$ с.

4 Вентилятор вращается с частотой $n = 600$ об/мин. После выключения он начал вращаться равнозамедленно и, сделав $N = 50$ оборотов, остановился. Работа A сил торможения равна 31,4 Дж. Определите момент сил торможения и момент инерции вентилятора.

5 Частота вращения маховика, момент инерции которого равен $120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, составляет $n = 240$ об/мин. После прекращения действия на него вращающего момента маховик под действием силы трения в подшипниках остановился за время $t = 3,14$ мин. Считая трение в подшипниках постоянным, определите момент сил трения.

6 Определите массу однородного сплошного диска, насаженного на ось, к ободу которого приложена постоянная касательная сила $F = 40$ Н, если через $t = 5$ с после начала действия силы его кинетическая энергия составляла 2,5 кДж.

7 Колесо радиусом $R = 30$ см и массой $m = 3$ кг скатывается без трения по наклонной плоскости длиной $l = 5$ м и с углом наклона $\alpha = 25^\circ$. Определить момент инерции колеса, если его скорость в конце движения составляла 4,6 м/с.

8 С наклонной плоскости, составляющей угол $\alpha = 30^\circ$ с горизонтом, скатывается без скольжения шарик. Пренебрегая трением, определите время движения шарика по наклонной плоскости, если известно, что его центр масс при скатывании понизился на 30 см.

9 На однородный сплошной цилиндрический вал радиусом $R = 50$ см намотана легкая нить, к концу которой прикреплен груз массой $m = 6,4$ кг. Груз, разматывая нить, опускается с ускорением $a = 2 \text{ м/с}^2$. Определите: 1) момент инерции вала; 2) массу m вала.

10 На однородный сплошной цилиндрический вал радиусом $R = 20$ см, момент инерции которого $J = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, намотана легкая нить, к концу которой прикреплен груз массой $m = 0,5$ кг. До начала

вращения барабана высота h груза над полом составляла 2,3 м. Определите: 1) время опускания груза до пола; 2) силу натяжения нити; 3) кинетическую энергию груза в момент удара о пол.

11 Через неподвижный блок в виде однородного сплошного цилиндра массой $m = 0,2$ кг перекинута невесомая нить, к которой прикреплены тела массами $m_1 = 0,35$ кг и $m_2 = 0,55$ кг. Пренебрегая трением в оси блока, определите: 1) ускорение груза; 2) отношение T_2/T_1 сил натяжения нити.

12 Тело массой $m_1 = 0,25$ кг, соединенное невесомой нитью посредством блока (в виде полого тонкостенного цилиндра) с телом массой $m_2 = 0,2$ кг, скользит по поверхности горизонтального стола. Масса блока $m = 0,15$ кг. Коэффициент трения тела о поверхность равен 0,2. Пренебрегая трением в блоке, определите: 1) ускорение, с которым будут двигаться эти тела; 2) силы натяжения нити по обе стороны блока.

13 Платформа в виде круглого однородного диска массой $M = 120$ кг вращается по инерции около вертикальной оси с частотой $n_1 = 10$ мин⁻¹. На краю платформы стоит человек массой $m = 60$ кг. С какой частотой будет вращаться платформа, если он перейдет к её центру?

14 Платформа в виде круглого однородного диска массой $M = 25$ кг и радиусом $R = 0,8$ м вращается по инерции около вертикальной оси с частотой $n_1 = 18$ мин⁻¹. В центре стоит человек и держит в расставленных руках гири. Определите частоту вращения платформы, если человек опустит руки, уменьшит свой момент инерции от $J_1 = 3,5$ кг·м² до $J_2 = 1$ кг·м².

Контрольные вопросы

- 1 Что такое момент инерции тела?
- 2 Какова роль момента инерции во вращательном движении?
- 3 Выведите формулу для момента инерции обруча.
- 4 Сформулируйте и поясните теорему Штейнера.
- 5 Какова формула для кинетической энергии тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, и как ее вывести?
- 6 Что называется моментом силы относительно неподвижной точки? Относительно неподвижной оси? Как определяется направление момента силы?
- 7 Выведите и сформулируйте уравнение динамики вращательного движения твердого тела.
- 8 Что такое момент импульса материальной точки? Твердого тела?
- 9 Как определяется направление вектора момента импульса?
- 10 В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса? В каких системах он выполняется? Приведите примеры.

11 Каким свойством симметрии пространства обуславливается справедливость закона сохранения момента импульса?

12 Сопоставьте основные уравнения динамики поступательного и вращательного движений, прокомментировав их аналогию.

7 ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕХАНИКИ

Требования к исходному уровню знаний и умений

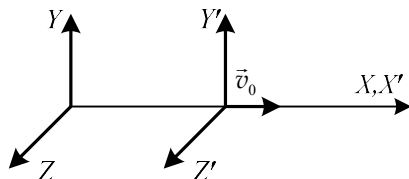
Знать определения следующих физических понятий: механический принцип относительности; преобразования Галилея; преобразования Лоренца и их следствия.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: масса покоя; энергия покоя; релятивистская масса; релятивистский импульс; релятивистская энергия.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: постулаты специальной теории относительности; основной закон релятивистской динамики материальной точки; закон взаимосвязи массы и энергии; закон сложения скоростей.

Сведения из теории

Рассмотрим две системы отсчета. Будем считать, что оси Y , Y' и Z , Z' сонаправлены, а относительная скорость v_0 системы координат K' направлена вдоль общей оси XX' .



Принцип относительности Галилея: все механические явления в различных инерциальных системах отсчета протекают одинаковым образом, вследствие чего никакими механическими опытами невозможно установить, покоится данная система отсчета или движется прямолинейно и равномерно.

Преобразования Галилея

$$\begin{aligned}x &= x' + v_0 t, \quad y = y', \quad z = z', \\t &= t' .\end{aligned}$$

Постулаты специальной теории относительности (СТО):

1) все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта;

2) скорость света c в пустоте (вакууме) одинакова во всех инерциальных системах отсчёта и не зависит от движения источников и приёмников света.

Преобразования Лоренца

$$x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \frac{t' + v_0 x'/c^2}{\sqrt{1 - v_0^2/c^2}}.$$

Следствия из преобразований Лоренца.

1 Относительность одновременности событий в разных системах отсчёта.

2 Относительность длин тел в разных системах отсчёта (сокращение длины)

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

где l_0 – длина стержня в системе координат, относительно которой стержень покоится (собственная длина, стержень расположен вдоль оси X); l – длина стержня, измеренная в системе, относительно которой он движется со скоростью v .

3 Относительность длительности событий в разных системах отсчёта (замедление времени)

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Релятивистский закон сложения скоростей

$$v = \frac{v' + v_0}{1 + (v_0 v' / c^2)},$$

где v – абсолютная скорость (скорость тела относительно системы K); v' – относительная скорость (скорость тела относительно системы K'); v_0 – переносная скорость (скорость системы K' относительно K).

Релятивистский импульс

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_r \vec{v}.$$

Релятивистская масса

$$m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Здесь m_0 – масса покоя.

Основной закон релятивистской динамики материальной точки

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

Энергия в релятивистской механике

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Полная энергия релятивистской частицы

$$E = mc^2, \quad E = E_0 + T = m_0 c^2 + T,$$

где T – кинетическая энергия частицы; $E_0 = m_0 c^2$ – ее энергия покоя.

Связь полной энергии с импульсом релятивистской частицы

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4.$$

Закон взаимосвязи массы и энергии

$$\Delta E = \Delta m_r c^2 \Leftrightarrow \Delta m_r = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Определите, во сколько раз увеличивается время жизни нестабильной частицы (по часам неподвижного наблюдателя), если она начинает двигаться со скоростью $0,9c$.

2 Собственное время жизни частицы отличается на 1 % от времени жизни по неподвижным часам. Определите $\beta = v/c$.

3 Определите относительную скорость движения v , при которой релятивистское сокращение линейных размеров составляет 10 %.

4 Определите собственную длину стержня l_0 , если в лабораторной системе его скорость $v = 0,6c$, длина $l = 1,5$ м и угол между стержнем и направлением его движения $\varphi = 30^\circ$.

5 Космический корабль удаляется от Земли с относительной скоростью $v_1 = 0,8c$, а затем с него стартует ракета (в направлении от Земли) со скоростью $v_2 = 0,8c$ относительно корабля. Определите скорость u ракеты относительно Земли.

6 Ионизированный атом, вылетев из ускорителя со скоростью $v = 0,8c$, испустил фотон в направлении своего движения. Определите скорость фотона относительно ускорителя.

7 Частица движется со скоростью $v = 0,8c$. Определите отношение массы релятивистской частицы к её массе покоя.

8 Определите, на сколько процентов масса релятивистской элементарной частицы, вылетающей из ускорителя со скоростью $v = 0,75c$, больше её массы покоя.

9 Определите скорость движения v релятивистской частицы, если её масса в два раза больше массы покоя.

10 Определите релятивистский импульс протона p , если скорость его движения $v = 0,8c$.

11 Определите скорость v , при которой релятивистский импульс частицы превышает её ньютоновский импульс в $n = 3$ раза.

12 Полная энергия релятивистской частицы в 8 раз превышает её энергию покоя. Определите скорость v этой частицы.

13 Кинетическая энергия частицы оказалась равной её энергии покоя. Определите скорость частицы v .

14 Определите релятивистский импульс p и кинетическую энергию T протона, движущегося со скоростью $v = 0,75c$.

15 Определите кинетическую энергию T электрона, если масса движущегося электрона втрое больше его массы покоя. Ответ выразите в электронвольтах.

16 Определите, какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти протон, чтобы его скорость составила 90 % скорости света.

Контрольные вопросы

1 В чем заключается физическая сущность механического принципа относительности?

2 В чем заключается правило сложения скоростей в классической механике?

3 Каковы причины возникновения специальной теории относительности?

4 В чем заключаются основные постулаты специальной теории относительности?

5 Зависит ли от скорости движения системы отсчета скорость тела? Скорость света?

6 Запишите и прокомментируйте преобразования Лоренца. При каких условиях они переходят в преобразования Галилея?

7 Какой вывод о пространстве и времени можно сделать на основе преобразований Лоренца?

8 Одновременны ли события в системе K' , если в системе K они происходят в одной точке и одновременны? В системе K события разобщены, но одновременны? Обоснуйте ответ.

9 Какие следствия вытекают из специальной теории относительности для размеров тел и длительности событий в разных системах отсчета? Обоснуйте ответ.

10 В чем состоит «парадокс близнецов» и как его разрешить?

11 В чем заключается релятивистский закон сложения скоростей? Как показать, что он находится в согласии с постулатами Эйнштейна?

12 Как определяется интервал между событиями? Докажите, что он является инвариантом при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

13 Какой вид имеет основной закон релятивистской динамики? Чем он отличается от основного закона ньютоновской механики?

14 Сформулируйте закон сохранения релятивистского импульса.

15 Как выражается кинетическая энергия в релятивистской механике? При каком условии релятивистская формула для кинетической энергии переходит в классическую формулу?

16 Сформулируйте и запишите закон взаимосвязи массы и энергии. В чем его физическая сущность? Приведите примеры его экспериментального подтверждения.

8 ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: молекулярная физика; термодинамика; термодинамическая система; термодинамический метод исследования; статистический метод исследования; термодинамические параметры (параметры состояния); термодинамический процесс; идеальный газ; парциальное давление; броуновское движение.

Знать определения следующих физических процессов: изотермический; изобарный; изохорный.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения: количество вещества; средняя квадратичная скорость движения молекул; средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: Бойля – Мариотта; Гей-Люссака; Шарля; объединенный газовый закон; закон Авогадро; закон Дальтона.

Уметь записать уравнение состояния идеального газа.

Уметь представить графики зависимости между параметрами состояния газа при постоянной температуре, давлении и объеме.

Уметь записать основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов.

Сведения из теории

Количество однородного вещества (в молях)

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{m}{\mu},$$

где N – число молекул; N_A – постоянная Авогадро; m – масса; μ – молярная масса вещества.

Если система представляет собой смесь нескольких газов, то количество вещества системы

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n},$$

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

Закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс – $t = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$pV = \text{const}.$$

Законы Гей-Люссака:

1) объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad \text{при} \quad p = \text{const}, \quad m = \text{const},$$

т. е. это изобарный процесс;

2) давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:

$$p = p_0(1 + \alpha t) \quad \text{при} \quad V = \text{const}, \quad m = \text{const},$$

т. е. это изохорный процесс.

Второй закон Гей-Люссака еще называют законом Шарля.

В этих уравнениях t – температура по шкале Цельсия; p_0 и V_0 – давление и объем при 0°C ; коэффициент $\alpha = 1/273,15 \text{ K}^{-1}$.

Термодинамическая температура

$$T = 273 + t.$$

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева)

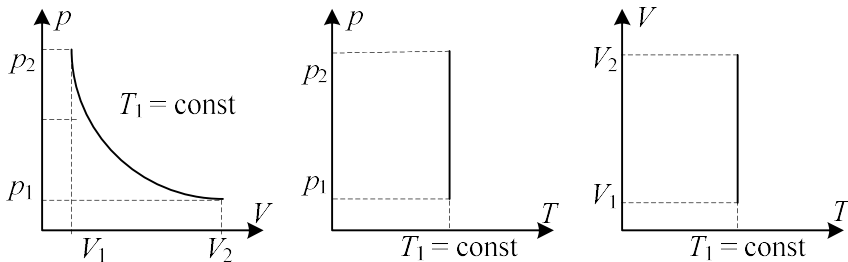
$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT,$$

где p – давление; V – объем; m – масса; μ – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; ν – количество вещества.

Опытные газовые законы, являющиеся частными случаями уравнения состояния для изопроцессов:

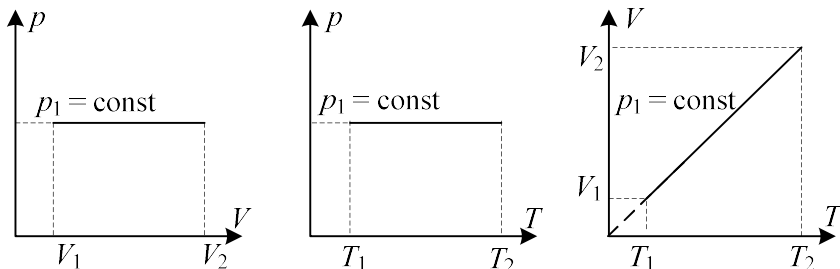
а) закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс – $T = \text{const}$, $m = \text{const}$) для двух состояний газа:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2;$$

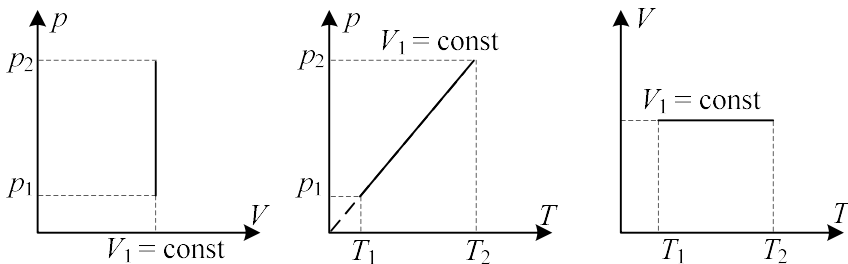


б) закон Гей-Люссака (изобарный процесс – $p = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ или } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$



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



$$\frac{p}{T} = \text{const} \text{ или } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

г) объединённый газовый закон ($m = \text{const}$):

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

где p_1, V_1, T_1 – давление, объём и температура газа в начальном состоянии; p_2, V_2, T_2 – те же величины в конечном состоянии.

Закон Дальтона, определяющий давление смеси n идеальных газов,

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

где p_i – парциальное давление i -й компоненты смеси.

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

Молярная масса смеси n газов

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n},$$

где m_i и ν_i – масса и количество вещества i -й компоненты смеси.

Концентрация молекул

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

где N – число молекул в системе; V – объём системы; ρ – плотность вещества; N_A – число Авогадро. Формула справедлива для любого состояния вещества.

Нормальные условия –

$$\begin{aligned} p_0 &= 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}, \\ T_0 &= 273,15 \text{ К}, \\ V_\mu &= 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}. \end{aligned}$$

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Давление газа, оказываемое им на стенку сосуда,

$$p = \frac{1}{3} nm_0 v^2,$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы; v – скорость молекул.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} n \langle \epsilon \rangle \quad \text{или} \quad pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} E,$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы; $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ – средняя квадратичная скорость молекул; $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул; m – масса газа в объеме V ; E – суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул.

Средняя квадратичная скорость молекул газа

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2}kT.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Найти количество вещества ν и число N молекул водорода массой $m = 0,5$ кг.

2 Баллон объемом 10 л содержит углекислый газ под давлением $p = 1,5$ МПа и при температуре $T = 300$ К. Определить массу m газа.

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

4 При нагревании идеального газа на $\Delta T = 2$ К при постоянном давлении его объем увеличился на $1/200$ первоначального объема. Найти первоначальную температуру T газа.

5 В баллоне объемом $V = 10$ л находится гелий под давлением $p_1 = 1$ МПа при температуре $T_1 = 300$ К. После откачки из баллона гелия массой $m = 10$ г, температура в баллоне понизилась до $T_2 = 290$ К. Определить давление p_2 газа, оставшегося в баллоне.

6 В сосуде вместимостью 3 л находится кислород массой 10 г. Определите концентрацию n и число молекул N кислорода в сосуде.

7 В закрытом сосуде вместимостью 20 л находятся водород массой 6 г и гелий массой 12 г. Определите давление p и молярную массу μ смеси, если её температура составляет 300 К.

8 В сосуде вместимостью $V = 0,3$ л при температуре $T = 290$ К находится некоторый газ. На сколько понизится давление газа в сосуде, если из него из-за утечки выйдет $N = 10^{19}$ молекул?

9 В цилиндр длиной $l = 1,6$ м, заполненный воздухом при нормальном атмосферном давлении, начали медленно вдвигать поршень площадью $S = 200$ см². Определить силу F , которая будет действовать на поршень, если его остановить на расстоянии $d = 10$ см от дна цилиндра.

10 В сосуде объемом $V = 15$ л содержится азот и водород при температуре $t = 23$ °С и давлении $p = 200$ кПа. Определить массы смеси и её компонентов, если массовая доля азота в смеси $w_1 = 0,7$.

11 Оболочка аэростата объемом $V = 1600$ м³, находящегося на поверхности Земли, на $7/8$ заполнена водородом при давлении $p_0 = 100$ кПа и температуре $T_0 = 290$ К. Аэростат подняли на некоторую высоту, где давление составляет $p_1 = 80$ кПа и температура равна $T_1 = 280$ К. Определите массу водорода Δm , вышедшего из оболочки аэростата при его подъеме.

12 Колба объемом $V = 300$ см³, закрытая пробкой с краном, содержит разреженный воздух. Для измерения давления в колбе ее горлышко погрузили на незначительную глубину и открыли кран, в результате чего в колбу вошла вода массой $m = 292$ г. Определить первоначальное давление в колбе p_0 , если атмосферное давление равно $p = 100$ кПа.

13 Во сколько раз и как изменится средняя скорость движения молекул при переходе от кислорода к водороду?

14 Давление газа равно 1 мПа, концентрация его молекул равна 10^{10} см⁻³. Определить температуру газа T и среднюю энергию поступательного движения молекул газа $\langle \varepsilon_n \rangle$.

15 Используя основное уравнение МКТ, определите давление p , оказываемое газом на стенки сосуда, если его плотность равна $0,01$ кг/м³, а средняя квадратичная скорость молекул газа составляет 480 м/с.

Контрольные вопросы

1 Почему термодинамический и статистический (молекулярно-кинетический) методы исследования макроскопических систем качественно различны и взаимно дополняют друг друга?

2 Что такое термодинамические параметры? Какие термодинамические параметры вам известны?

3 Как объяснить закон Бойля – Мариотта с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

4 Какими законами описываются изобарные и изохорные процессы?

5 Каков физический смысл постоянной Авогадро? Числа Лошмидта?

6 В чем заключается молекулярно-кинетическое толкование давления газа? Термодинамической температуры?

7 В чем содержание и какова цель вывода основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов?

9 ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: вероятность.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: средняя арифметическая, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорость движения молекул газа; относительная скорость.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон Максвелла (распределение Максвелла); распределение Больцмана; распределение Максвелла – Больцмана; закон изменения давления газа с высотой (барометрическая формула).

Уметь представить графики функции распределения Максвелла по скоростям.

Сведения из теории

Закон Максвелла распределения молекул идеального газа по скоростям

$$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv} = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{m_0 v^2}{2kT} \right),$$

где $f(v)$ – функция распределения молекул по скоростям, определяющая долю числа молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v + dv$.

Число молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от u до $u + du$,

$$dN(u) = Nf(u)du = \frac{4}{\sqrt{\pi}} Nu^2 \exp(-u^2) du,$$

где $u = v/v_b$ – относительная скорость, равная отношению скорости молекул v к наиболее вероятной скорости v_b ; $f(u)$ – функция распределения по относительным скоростям.

Распределение молекул по энергиям. Число молекул, энергии которых заключены в интервале от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$,

$$dN(\varepsilon) = Nf(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) \varepsilon^{\frac{1}{2}} (kT)^{-\frac{3}{2}} d\varepsilon,$$

где $f(\varepsilon)$ – функция распределения по энергиям.

Скорость молекул (m_0 – масса молекулы):

$$1) \text{ наиболее вероятная } - v_B = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}};$$

$$2) \text{ средняя квадратичная } - \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}};$$

$$3) \text{ средняя арифметическая } - \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Средняя полная кинетическая энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где i – число степеней свободы молекулы. Для одноатомной молекулы $i = 3$, для двухатомной – $i = 5$, для многоатомной – $i = 6$.

Барометрическая формула

$$p_h = p_0 \exp\left[-\frac{\mu g(h-h_0)}{RT}\right],$$

где p_h и p_0 – давление газа на высоте h и h_0 .

Распределение Больцмана во внешнем потенциальном поле

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

где n – концентрация частиц; n_0 – концентрация частиц в точках, где потенциальная энергия частиц $U = 0$.

Распределение Максвелла – Больцмана

$$dn_{w_n, v} = n_0 \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m_0}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{W_n + \frac{m_0 v^2}{2}}{kT}\right] v^2 dv.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Определите наиболее вероятную v_v , среднюю арифметическую $\langle v \rangle$ и среднюю квадратичную $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ скорости молекул азота при температуре 27 °С.

2 При какой температуре T средняя квадратичная скорость молекул кислорода больше их наиболее вероятной скорости на 100 м/с.

3 Определите наиболее вероятную v_v скорость молекул газа, плотность которого при давлении 40 кПа составляет 0,35 кг/м³.

4 Используя закон распределения молекул идеального газа по скоростям, получите формулу наиболее вероятной скорости.

5 Используя закон распределения молекул идеального газа по скоростям, найдите закон, выражающий распределение молекул по относительным скоростям u .

6 Используя закон распределения молекул идеального газа по скоростям, получите формулу средней арифметической скорости.

7 Используя закон распределения молекул идеального газа по скоростям, получите формулу средней квадратичной скорости.

8 Используя закон распределения молекул идеального газа по энергиям, получите формулу средней кинетической энергии молекул.

9 Используя закон распределения молекул идеального газа по энергиям, найдите формулу наиболее вероятного значения их энергии.

10 Закон распределения молекул идеального газа по скоростям в некотором молекулярном пучке имеет вид $f(v) = Av^3 \exp(-v^2 / 2kT)$. Определите: 1) наиболее вероятную скорость v_v ; 2) наиболее вероятное значение энергии молекул в этом пучке.

11 На какой высоте h давление воздуха составляет 60 % от давления на уровне моря? Считайте, что температура воздуха везде одинакова и равна 10 °С.

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

13 Каково давление воздуха p в шахте на глубине 1 км, если считать, что температура по всей высоте постоянная и равна 22 °С, а ускорение свободного падения не зависит от высоты? Давление воздуха у поверхности Земли принять равным p_0 .

14 Определите отношение давления воздуха на высоте 1 км к давлению на дне скважины глубиной 1 км. Воздух у поверхности Земли находится при нормальных условиях и его температура не зависит от высоты.

15 Какая часть молекул кислорода при 0 °С обладает скоростью от 100 м/с до 110 м/с?

Контрольные вопросы

- 1 Каков физический смысл распределения молекул по скоростям?
- 2 Каков физический смысл распределения молекул по энергиям?
- 3 Как, зная функцию распределения молекул по скоростям, перейти к функции распределения по энергиям?
- 4 Как определяется наиболее вероятная скорость?
- 5 Как определяется средняя скорость?
- 6 В чем суть распределения Больцмана?

10 ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ИЗОПРОЦЕССАМ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: внутренняя энергия; степени свободы молекулы; равновесные и неравновесные процессы; адиабатный процесс; обратимый и необратимый термодинамические процессы; круговой процесс (или цикл); прямой и обратный цикл; приведенное количество теплоты; изоэнтропийный процесс.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: средняя энергия молекулы; внутренняя энергия для произвольной массы m газа; удельная теплоемкость вещества; молярная теплоемкость; теплоемкость при постоянном объеме; теплоемкость при постоянном давлении; показатель адиабаты (или коэффициент Пуассона).

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекулы; первое начало термодинамики; первое начало термодинамики для изопроцессов.

Уметь записать формулу полной работы, совершаемой газом при изменении его объема, и изобразить ее графически; формулы первого начала термодинамики для изопроцессов; уравнение Майера и знать его физический смысл; уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона).

Сведения из теории

Средняя полная кинетическая энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где i – число степеней свободы молекулы.

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R,$$

где i – число степеней свободы; R – универсальная газовая постоянная.

Связь между удельной (c) и молярной (C) теплоемкостями

$$C = c\mu,$$

где μ – молярная масса.

Уравнение Майера

$$C_p - C_V = R.$$

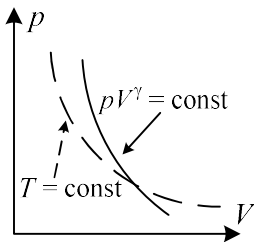
Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} C_V T.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T.$$

Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона)



$$\begin{aligned} pV^\gamma &= \text{const}, \\ TV^{\gamma-1} &= \text{const}, \\ T^\gamma p^{1-\gamma} &= \text{const}, \end{aligned}$$

где γ – показатель адиабаты,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

Уравнение политропы

$$pV^n = \text{const},$$

где $n = (C - C_p) / (C - C_V)$ – показатель политропы.

Работа, совершаемая газом при изменении его объема, в общем случае вычисляется по формуле

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

где V_1 и V_2 – начальный и конечный объемы газа.

Работа при изобарном процессе ($p = \text{const}$)

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

– при изотермическом ($T = \text{const}$) –

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

– при адиабатном ($\Delta Q = 0$) –

$$A = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$

или, используя уравнения Пуассона,

$$A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right];$$

– при политропном ($C = \text{const}$) –

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{n - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right),$$

где $T_1, T_2, V_1, V_2, p_1, p_2$ – соответственно начальные и конечные температура, объем и давление газа.

Первое начало термодинамики

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

где Q – количество теплоты, сообщенное газу; ΔU – изменение его внутренней энергии; A – работа газа против внешних сил.

Первое начало термодинамики при изобарном процессе

$$Q = \Delta U + A = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T;$$

– при изохорном ($A = 0$) –

$$Q = \Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T;$$

– при изотермическом ($\Delta U = 0$) –

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

– при адиабатном ($\Delta Q = 0$) –

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} C_V \Delta T.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Найти среднюю кинетическую энергию $\langle \epsilon_{\text{вр}} \rangle$ вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 286$ К, а также кинетическую энергию $W_{\text{вр}}$ вращательного движения всех молекул этого газа, если его масса $m = 4$ г.

2 Определите кинетическую энергию $\langle \epsilon_1 \rangle$, приходящуюся в среднем на одну степень свободы молекулы азота, при температуре $T = 1000$ К, а также $\langle \epsilon_{\text{п}} \rangle$ – среднюю кинетическую энергию поступательного движения, $\langle \epsilon_{\text{вр}} \rangle$ – вращательного движения и $\langle \epsilon \rangle$ – среднее значение полной кинетической энергии молекулы.

3 Определить количество теплоты Q , поглощаемое водородом массой $m = 0,2$ кг при нагревании его от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С при постоянном давлении. Найти также изменение внутренней энергии газа ΔU и совершаемую им работу A .

4 Кислород объемом 1 л находится под давлением 1 МПа. Определите, какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы: 1) увеличить его объем вдвое в результате изобарного процесса; 2) увеличить его давление вдвое в результате изохорного процесса.

5 Некоторый газ массой $m = 1$ кг находится при температуре $T = 300$ К и под давлением $p_1 = 0,5$ МПа. В результате изотермического сжатия давление газа увеличилось в два раза. Работа, затраченная на сжатие, $A = 432$ кДж. Определите: 1) какой это газ; 2) первоначальный удельный объем газа.

6 Работа расширения некоторого двухатомного идеального газа составляет $A = 1$ кДж. Определите количество подведенной к газу теплоты, если процесс протекал: 1) изотермически; 2) изобарно.

7 При адиабатном расширении кислорода ($\nu = 2$ моль), находящегося при нормальных условиях, его объем увеличился в $n = 3$ раза. Определите: 1) изменение внутренней энергии газа ΔU ; 2) работу расширения газа A .

8 Азот массой $m = 1$ кг занимает при температуре $T_1 = 300$ К объем $V_1 = 0,5$ м³. В результате адиабатного сжатия давление газа увеличилось в 3 раза. Определите: 1) конечный объем газа; 2) его конечную температуру; 3) изменение внутренней энергии газа.

9 Считая азот идеальным газом, определить его удельную теплоемкость: 1) для изохорного процесса; 2) для изобарного процесса.

10 Некоторый газ при нормальных условиях имеет удельный объем $0,7$ м³/кг. Определите удельные теплоемкости c_v и c_p этого газа.

11 Определите удельные теплоемкости c_v и c_p смеси углекислого газа массой $m_1 = 3$ г и азота массой $m_2 = 4$ г.

12 Определите показатель адиабаты для смеси газов, содержащей гелий массой $m_1 = 8$ г и водород массой $m_2 = 2$ г.

13 Кислород объемом 1 л находится под давлением 1 МПа. Определите, какое количество теплоты Q необходимо сообщить газу, чтобы: 1) увеличить его объем вдвое в результате изобарного процесса; 2) увеличить его давление вдвое в результате изохорного процесса.

14 Газ переходит из одного и того же начального состояния 1 в одно и то же конечное состояние 2 в результате следующих процессов: а) изотермического; б) изобарного; в) изохорного. Рассмотрев эти процессы графически, покажите: 1) в каком процессе работа расширения максимальна; 2) когда газу сообщается максимальное количество теплоты.

15 Газ переходит из одного и того же начального состояния 1 в одно и то же конечное состояние 2 в результате следующих процессов: а) изобарного процесса; б) последовательных изохорного и изотермического процессов. Рассмотрите эти переходы графически. Одинаковы или различны в обоих случаях: 1) изменение внутренней энергии; 2) затраченное количество теплоты?

Контрольные вопросы

1 Почему колебательная степень свободы обладает вдвое большей энергией, чем поступательная и вращательная?

2 Что такое внутренняя энергия идеального газа? В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия системы?

3 Что такое теплоемкость газа? Какая из теплоемкостей – C_v или C_p – больше и почему?

4 Как объяснить температурную зависимость молярной теплоемкости водорода?

5 Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется при постоянном давлении?

6 Почему адиабата более крутая, чем изотерма?

7 Как изменится температура газа при его адиабатном сжатии?

11 ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ИХ КПД ДЛЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: обратимый и необратимый термодинамические процессы; круговой процесс (или цикл); прямой и обратный цикл; приведенное количество теплоты; изоэнтропийный процесс; термодинамическая вероятность состояния системы.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: термический коэффициент полезного действия для кругового процесса; энтропия.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: второе начало термодинамики (закон возрастания энтропии); третье начало термодинамики (теорема Нернста – Планка).

Уметь изобразить графически прямой или обратный цикл и записать, чему равна работа, совершаемая за этот цикл. Знать где каждый из циклов используется.

Уметь изобразить графически цикл Карно и назвать процессы, входящие в этот цикл.

Уметь записать формулы, определяющие изменение энтропии в процессах идеального газа.

Уметь записать и пояснить неравенство Клаузиуса.

Сведения из теории

Изменение энтропии при равновесном переходе системы из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Изменение энтропии идеального газа

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \left(C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right).$$

Изменение энтропии идеального газа при изобарном процессе

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_p \ln \frac{T_2}{T_1};$$

– при изохорном –

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1};$$

– при изотермическом –

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1};$$

– при адиабатном –

$$\Delta S = 0.$$

Неравенство Клаузиуса

$$\Delta S \geq 0.$$

Согласно Больцману энтропия системы S и термодинамическая вероятность W связаны между собой следующим образом:

$$S = k \ln W,$$

где k – постоянная Больцмана.

Теорема Нернста – Планка

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$$

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла)

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

где A – работа, совершаемая за цикл; Q_1 – количество теплоты, полученное системой; Q_2 – количество теплоты, отданное системой.

Цикл Карно – круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат:

1–2 $T_1 = \text{const}$, изотермическое расширение;

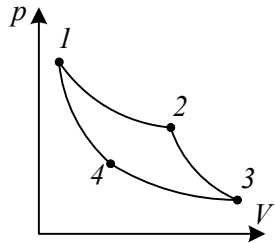
2–3 адиабатное расширение;

3–4 $T_2 = \text{const}$, изотермическое сжатие;

4–1 адиабатное сжатие.

КПД цикла Карно

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



где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

Холодильный коэффициент машины, работающей по обратному циклу Карно,

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{отв}}}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2},$$

где $Q_{\text{отв}}$ – количество теплоты, отведённое из холодильной камеры; A – совершённая работа; T_2 – температура более холодного тела (холодильной камеры); T_1 – температура более горячего тела (окружающей среды).

Задачи для самостоятельного решения

1 Определить изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении кислорода массой $m = 10$ г от объема $V_1 = 25$ л до объема $V_2 = 100$ л.

2 При нагревании двухатомного идеального газа ($\nu = 2$ моль) его термодинамическая температура увеличилась в 2 раза. Определите изменение энтропии ΔS , если нагревание происходит: 1) изохорно; 2) изобарно.

3 Идеальный газ ($\nu = 2$ моль) сначала изобарно нагрели так, что объем газа увеличился в 2 раза, а затем изобарно охладили так, что давление его уменьшилось в 2 раза. Определите приращение энтропии ΔS в ходе указанных процессов.

4 Найти изменение ΔS энтропии при нагревании воды массой $m = 1$ г от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С и ее последующем превращении в пар той же температуры (удельная теплоемкость $c = 4,18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), удельная теплота парообразования $\lambda = 22,6 \cdot 10^5$ Дж/кг).

5 Азот массой 28 г адиабатно расширили в 2 раза, а затем изобарно сжали до первоначального объема. Определите изменение энтропии в ходе указанных процессов.

6 Идеальный газ совершает цикл Карно, термический КПД которого равен 0,4. Определите работу изотермического сжатия, если работа изотермического расширения составляет 400 Дж.

7 Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя $T_1 = 500$ К, температура холодильника $T_2 = 300$ К. Работа изотермического расширения газа составляет 2 кДж. Определите: 1) термический КПД цикла; 2) количество теплоты, отданное газом при изотермическом сжатии холодильнику.

8 Идеальный двухатомный газ, занимающий объем $V_1 = 2$ л, подвергают адиабатному расширению, в результате которого его объем возрос в 5 раз. После этого газ подвергли изобарному сжатию до первоначального объема, а затем он в результате изохорного нагревания возвращен в первоначальное состояние. Постройте график цикла и определите термический КПД цикла.

9 Идеальный двухатомный газ ($\nu = 3$ моль), занимающий объем $V_1 = 5$ л и находящийся под давлением $p_1 = 1$ МПа, изохорно нагревают до $T_2 = 500$ К. После этого газ изотермически расширяется до начального давления, а затем он в результате изобарного сжатия возвращается в первоначальное состояние. Постройте график цикла и определите термический КПД цикла.

10 Рабочее тело – идеальный газ – теплового двигателя совершает цикл, состоящий из последовательных процессов: изобарного, адиабатного и изотермического. В результате изобарного процесса газ нагревается от $T_1 = 300$ К до $T_2 = 600$ К. Определите термический КПД теплового двигателя.

11 Идеальный газ, совершающий цикл Карно, 70 % количества теплоты, полученной от нагревателя, отдает холодильнику. Количество теплоты, получаемое от нагревателя равно 5 кДж. Определите: 1) термический КПД цикла; 2) работу, совершенную за полный цикл.

12 Многоатомный идеальный газ совершает цикл Карно, при этом в процессе адиабатного расширения объем газа увеличивается в 4 раза. Определите термический КПД цикла.

Контрольные вопросы

- 1 Проанализируйте прямой и обратный циклы.
- 2 Чем отличаются обратимые и необратимые процессы? Почему все реальные процессы необратимы?
- 3 Возможен ли процесс, при котором теплота, взятая от нагревателя, полностью преобразуется в работу?
- 4 В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? Незамкнутой системы?
- 5 Охарактеризуйте понятие энтропии (определение, размерность и математическое выражение энтропии для различных процессов).
- 6 Изобразите в системе координат T, S изотермический и адиабатный процессы.
- 7 Представив цикл Карно на диаграмме pV графически, укажите, какой площадью определяется: 1) работа, совершенная над газом; 2) работа, совершенная самим расширяющимся газом.
- 8 Представьте графически цикл Карно в переменных T, S .

12 ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОГО И ТВЕРДОГО СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: явления переноса; теплопроводность; диффузия; внутреннее трение; вакуум; разреженный газ; радиус молекулярного действия; молекулярное (или

внутреннее) давление; поверхностно-активные вещества; смачивание (несмачивание); избыточное (добавочное) давление; капиллярность; испарение, сублимация, конденсация, плавление и кристаллизация; фазовые переходы I и II рода; тройная точка.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: средняя длина свободного пробега молекул; эффективный диаметр молекул; среднее число столкновений молекул, теплопроводность (коэффициент теплопроводности); плотность теплового потока; плотность потока массы; диффузия (коэффициент диффузии); плотность потока импульса; динамическая вязкость; поверхностная энергия; краевой угол.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: Закон Фурье; закон Фика; закон Ньютона; закон Дюлонга и Пти.

Уметь записать уравнение Ван-дер-Ваальса (уравнение состояния реальных газов) для 1 моля газа и для произвольного количества вещества; формулу Лапласа; уравнение Клапейрона – Клаузиуса.

Уметь изобразить графически изотермы Ван-дер-Ваальса и указать критические параметры.

Уметь изобразить графически диаграмму состояния фазовых превращений.

Сведения из теории

Среднее число соударений, испытываемых молекулой газа за 1 с,

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle,$$

где d – эффективный диаметр молекулы; n – концентрация молекул; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекулы.

Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}.$$

Импульс, переносимый молекулами из одного слоя газа в другой через элемент поверхности площадью ΔS за время dt ,

$$dp = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S dt,$$

где η – динамическая вязкость газа; dv/dz – поперечный градиент скорости течения его слоев.

Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

где ρ – плотность газа (жидкости).

Закон Ньютона для силы внутреннего трения (вязкости) между слоями площадью ΔS

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} \Delta S.$$

Закон Фурье для теплопроводности

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S \Delta t,$$

где ΔQ – теплота, прошедшая посредством теплопроводности через площадку S за время Δt ; dT/dx – градиент температуры; λ – теплопроводность.

Для газов

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; ρ – плотность газа.

Закон Фика для диффузии

$$\Delta m = -D \frac{d\rho}{dx} S \Delta t,$$

где Δm – масса вещества, переносимая в результате диффузии через поверхность площадью S за время Δt ; D – коэффициент диффузии; $d\rho/dx$ – градиент плотности.

Для газов

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

Закон Дюлонга и Пти: молярная теплоемкость C химически простых твердых тел

$$C = 3R,$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT,$$

где p – давление; m – масса; μ – молярная масса; a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса; V – объем; T – термодинамическая температура.

Связь критических параметров – объема, давления и температуры газа – с постоянными Ван-дер-Ваальса:

$$V_{\text{кр}} = 3b \frac{m}{\mu}; \quad p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27Rb}.$$

Внутренняя энергия реального газа

$$U = \nu \left(C_V T - \frac{\nu a}{V} \right).$$

Коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = F/l,$$

где F – сила поверхностного натяжения, действующая на контур длиной l , ограничивающий поверхность жидкости.

При изотермическом увеличении площади поверхности пленки жидкости на ΔS совершается работа

$$A = \alpha \Delta S.$$

Добавочное давление Δp , вызванное кривизной поверхности жидкости, выражается формулой Лапласа

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

В случае сферической поверхности ($R_1 = R_2 = R$)

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}.$$

Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r},$$

где θ – краевой угол; ρ – плотность жидкости; r – радиус трубки.

Высота поднятия жидкости в зазоре между двумя близкими и параллельными плоскостями, находящимися на расстоянии d ,

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g d}.$$

При нагревании тела от 0 до t °С его длина (в первом приближении) изменяется от l_0 до l по закону

$$l = l_0 (1 + \alpha_l t),$$

где α_l – коэффициент линейного расширения.

При нагревании тела от 0 до t °С его объем изменяется от V_0 до V по закону

$$V = V_0 (1 + \alpha_V t),$$

где α_V – коэффициент объемного расширения ($\alpha_V \approx 3\alpha_l$).

Задачи для самостоятельного решения

1 Определите среднюю длину свободного пробега $\langle l \rangle$ атомов гелия, если плотность газа $\rho = 2 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.

2 Найти среднее число столкновений z , испытываемых молекулой кислорода при нормальных условиях в течение 1 с.

3 Найти среднюю длину свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул водорода при температуре 27 °С и давлении 0,5 кПа.

4 Баллон вместимостью $V = 10$ л содержит водород массой 1 г. Определить среднюю длину свободного пробега молекул $\langle l \rangle$.

5 Определите плотность ρ разреженного кислорода, если средняя длина свободного пробега молекул равна 1 см.

6 Определите, во сколько раз отличаются коэффициенты динамической вязкости η углекислого газа и азота, если оба газа находятся при одинаковой температуре и одном и том же давлении. Эффективные диаметры молекул этих газов равны.

7 Определите коэффициент диффузии D кислорода, если его коэффициент теплопроводности составляет $\lambda = 8,25$ мВт/(м·К).

8 Определите коэффициент динамической вязкости кислорода η , если его коэффициент диффузии составляет $D = 9 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

9 Определите коэффициент теплопроводности λ азота, если коэффициент динамической вязкости η для него при тех же условиях равен 10 мкПа·с.

10 Пространство между параллельными пластинами площадью 150 см², находящимися на расстоянии 5 мм друг от друга, заполнено кислородом. Одна пластина поддерживается при температуре 17 °С, а другая – при температуре 27 °С. Определите количество теплоты ΔQ , прошедшее за 5 мин посредством теплопроводности от одной пластины к другой. Кислород находится при нормальных условиях.

11 Определите массу азота Δm , прошедшего вследствие диффузии через площадку 50 см² за 20 с, если градиент плотности в направле-

нии, перпендикулярном площадке, равен 1 кг/м^4 . Температура азота 290 К , а средняя длина свободного пробега его молекул равна 1 мкм .

12 Пространство между двумя большими параллельными пластинами, расстояние между которыми 5 мм , заполнено гелием. Температура одной пластины поддерживается равной 290 К , другой – 310 К . Вычислить плотность теплового потока q . Расчеты выполнить для двух случаев, когда давление гелия равно: 1) $0,1 \text{ МПа}$; 2) 1 МПа .

13 При определении силы поверхностного натяжения капельным методом из капилляра вытекает $n = 50$ капель глицерина. Общая масса глицерина $m = 1 \text{ г}$, а диаметр шейки капли в момент отрыва $d = 1 \text{ мм}$. Определите поверхностное натяжение σ глицерина.

14 Давление воздуха внутри мыльного пузыря на $\Delta p = 200 \text{ Па}$ больше атмосферного. Определите диаметр d пузыря.

15 Воздушный пузырек диаметром $d = 0,02 \text{ мм}$ находится на глубине $h = 25 \text{ см}$ под поверхностью воды. Определите давление воздуха в этом пузырьке. Атмосферное давление примите нормальным.

16 Углекислый газ массой $6,6 \text{ кг}$ при давлении $0,1 \text{ МПа}$ занимает объем $3,75 \text{ мл}$. Определите температуру газа, если: 1) газ реальный; 2) газ идеальный. Принять поправки Ван-дер-Ваальса следующими: $a = 0,361 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$ и $b = 4,28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$.

17 Углекислый газ массой $2,2 \text{ кг}$ находится при температуре 290 К в сосуде вместимостью 30 л . Определите давление газа, если: 1) газ реальный; 2) газ идеальный. Принять поправки Ван-дер-Ваальса $a = 0,361 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$ и $b = 4,28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$ соответственно.

18 Кислород ($\nu = 10$ моль) занимает объем $V = 5 \text{ л}$. Определите внутреннее давление газа p' ; собственный объем молекул V' . Принять поправки Ван-дер-Ваальса следующими $a = 0,136 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$; $b = 3,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$.

19 В цилиндре под поршнем находится хлор массой $m = 20 \text{ г}$. Определите изменение внутренней энергии ΔU хлора при его изотермическом расширении от $V_1 = 200 \text{ см}^3$ до $V_2 = 500 \text{ см}^3$ (постоянная Ван-дер-Ваальса $a = 0,65 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$).

20 Давление разреженного газа в рентгеновской трубке при температуре $17 \text{ }^\circ\text{С}$ равно 130 мкПа . Можно ли вести разговор о высоком вакууме, если характерный размер l_0 (расстояние между катодом и анодом трубки) составляет 50 мм ? Эффективный диаметр воздуха примите равным $0,27 \text{ нм}$.

21 Используя закон Дюлонга и Пти определите удельную теплоемкость: 1) натрия; 2) алюминия.

Контрольные вопросы

1 Зависит ли средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа? Почему? Как изменится средняя длина свободного пробега молекул с увеличением давления?

2 В чем сущность явлений переноса? Каковы они и при каких условиях возникают? Объясните физическую сущность законов Фурье, Фика, Ньютона.

3 Чем отличаются реальные газы от идеальных?

4 Запишите и проанализируйте уравнение Ван-дер-Ваальса для 1 моль газа; для произвольного количества вещества. Каков смысл поправок при выводе уравнения Ван-дер-Ваальса?

5 Каков критерий различных агрегатных состояний вещества?

6 Что такое насыщенный пар? Почему перегретая жидкость и пересыщенный пар являются метастабильными состояниями?

7 При адиабатном расширении газа в вакуум его внутренняя энергия не изменяется. Как изменится температура, если газ идеальный? Реальный?

8 Почему у всех веществ поверхностное натяжение уменьшается с температурой?

9 Что представляют собой поверхностно-активные вещества?

10 При каком условии жидкость смачивает твердое тело? Не смачивает?

11 От чего зависит высота поднятия смачивающей жидкости в капилляре? Что такое капиллярность?

12 Что такое узлы кристаллической решетки?

13 В чем заключается анизотропность монокристаллов?

14 Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?

16 Как можно классифицировать кристаллы?

17 Что такое ионная связь? Ковалентная связь?

18 Какие типы кристаллографических систем вам известны?

19 Как получить закон Дюлонга и Пти, исходя из классической теории теплоемкости?

21 Некоторое количество твердого вещества смешано с тем же веществом в жидком состоянии. Почему при нагревании этой смеси ее температура не поднимается?

22 Что такое фаза? Фазовый переход? Чем отличается фазовый переход I рода от фазового перехода II рода?

23 Что можно «вычитать» из диаграммы состояния, используемой для изображения фазовых превращений?

13 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: электрический заряд (положительный и отрицательный); электризация тел; диэлектрики; полупроводники; точечный заряд; электрическое поле; электростатическое поле; пробный заряд; линии напряженности электрического поля; однородное и неоднородное электрические поля.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы из-

мерения и направление (для векторных величин): диэлектрическая проницаемость среды; напряженность электрического поля; поток вектора напряженности; линейная плотность заряда; поверхностная плотность заряда; объемная плотность заряда; поток вектора напряженности.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон сохранения электрического заряда; закон Кулона.

Уметь воспроизвести и описать теорему Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме.

Уметь записать формулу напряженности электрического поля, создаваемого точечным зарядом; равномерно заряженной плоскостью; равномерно заряженной сферой; равномерно заряженной нитью (цилиндром).

Уметь изобразить графически и описать в векторном виде принцип суперпозиции (наложения) электрических полей.

Сведения из теории

Закон Кулона (для однородной изотропной среды)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где F – сила взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2 ; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; r – расстояние между зарядами.

Закон сохранения электрического заряда

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const},$$

где $\sum q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, входящих в электрически изолированную систему; n – число зарядов.

Напряжённость электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

где \vec{F} – сила, действующая на точечный положительный заряд q_0 , помещённый в данную точку поля.

Поток вектора напряжённости электрического поля:

а) через произвольную поверхность, помещённую в неоднородное поле, –

$$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha dS,$$

где α – угол между вектором напряжённости поля и нормалью к элементу поверхности; dS – площадь элемента поверхности;

б) через плоскую поверхность S , помещённую в однородное электрическое поле, –

$$\Phi_E = ES \cos \alpha.$$

Поток вектора напряжённости электрического поля через замкнутую поверхность S –

$$\Phi_E = \oint_S E \cos \alpha dS,$$

где интегрирование ведётся по всей поверхности.

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме: поток вектора напряжённости через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую электрические заряды q_1, q_2, \dots, q_n ,

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i,$$

где $\sum q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, заключённых внутри этой замкнутой поверхности; n – число зарядов.

Напряжённость поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от заряда,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2}.$$

Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R и зарядом q на расстоянии r от центра сферы:

а) внутри сферы ($r < R$) –

$$E = 0;$$

б) на поверхности сферы ($r = R$) –

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{R^2};$$

в) вне сферы ($r > R$) –

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2}.$$

Принцип суперпозиции (наложения) электрических полей

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

В случае двух электрических полей с напряжённостями \vec{E}_1 и \vec{E}_2 модуль вектора напряжённости

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha},$$

где α – угол между векторами \vec{E}_1 и \vec{E}_2 .

Плотность заряда – линейная, поверхностная, объёмная (соответственно) –

$$\tau = \frac{dq}{dl}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}, \quad \rho = \frac{dq}{dV},$$

где l – длина; S – площадь; V – объём.

Напряжённость поля:

а) создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью, –

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon};$$

б) создаваемого двумя параллельными бесконечными равномерно и разноимённо заряженными плоскостями с одинаковой по модулю поверхностной плотностью заряда (поле плоского конденсатора), –

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon};$$

в) создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или цилиндром) на расстоянии r от оси, –

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{\tau}{r}.$$

Циркуляция вектора напряжённости электрического поля есть величина, численно равная работе по перемещению единичного точечного положительного заряда вдоль любого замкнутого контура.

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_l dl = 0.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Сила гравитационного притяжения двух водяных одинаково заряженных капель радиусами 0,1 мм уравнивается кулоновской силой отталкивания. Определите заряд капель.

2 Два точечных заряда $q_1 = 4$ нКл и $q_2 = -2$ нКл находятся на расстоянии $r = 60$ см друг от друга. Определить напряженность поля E_1 в точке, лежащей посередине между зарядами. Чему равна напряженность E_2 , если второй заряд положительный?

3 Электрическое поле создано точечными зарядами $q_1 = 2$ нКл и $q_2 = 3$ нКл. Расстояние между ними $d = 20$ см. Определите напряженность поля E , созданного этими зарядами в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 16$ см от первого и $r_2 = 12$ см от второго зарядов.

4 Тонкий стержень длиной $l = 10$ см несет равномерно распределенный по длине заряд с линейной плотностью $\tau = 1$ мкКл/м. На расстоянии $r_0 = 20$ см на продолжении оси стержня от ближайшего конца находится точечный заряд $q_0 = 100$ нКл. Определить силу взаимодействия стержня и точечного заряда.

5 Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в керосин. Какой должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и в керосине был один и тот же?

6 В вершинах равностороннего треугольника находятся одинаковые положительные заряды $q = 2$ нКл. Какой отрицательный заряд Q необходимо поместить в центре треугольника, чтобы сила притяжения с его стороны уравнесила силу отталкивания положительных зарядов?

7 Свинцовый шарик диаметром 0,5 см помещен в глицерин. Определите заряд шарика q , если в однородном электростатическом поле он оказался взвешенным в глицерине. Электростатическое поле направлено вертикально вверх, его напряженность $E = 4$ кВ/см.

8 Определите напряженность электростатического поля E в точке A , расположенной вдоль прямой, соединяющей заряды $q_1 = 10$ нКл и $q_2 = -8$ нКл и находящейся на расстоянии 8 см от отрицательного заряда. Расстояние между зарядами $l = 20$ см.

9 В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые положительные заряды $q = 2$ нКл. Определить напряженность электростатического поля E_1 в центре квадрата и E_2 – в середине одной из сторон квадрата.

10 Определите напряженность поля, создаваемого диполем с электрическим моментом $p = 1$ нКл·м на расстоянии $r = 25$ см от центра диполя в направлении, перпендикулярном оси диполя.

11 На некотором расстоянии от бесконечной равномерно заряженной плоскости с поверхностной плотностью $\sigma = 0,1$ нКл/см² расположена круглая пластина. Нормаль к плоскости пластины составляет с линиями напряженности угол 30° . Определите поток Φ_E вектора напряженности через эту пластину, если её радиус $r = 15$ см.

12 Определите поток Φ_E вектора напряженности электростатического поля через сферическую поверхность, охватывающую точечные заряды $q_1 = 5$ нКл и $q_2 = -2$ нКл.

13 Электростатическое поле создается двумя бесконечными параллельными плоскостями, заряженными равномерно одноименными зарядами с поверхностной плотностью соответственно $\sigma_1 = 1$ нКл/м² и $\sigma_2 = 2$ нКл/м². Определить напряженность электрического поля: 1) между плоскостями; 2) за пределами плоскостей. Построить график изменения напряженности вдоль оси, перпендикулярной плоскостям.

14 На металлической сфере радиусом 15 см находится заряд $Q = 2$ нКл. Определить напряженность E электростатического поля: 1) на расстоянии $r_1 = 10$ см от центра сферы; 2) на поверхности сферы; 3) на расстоянии $r_2 = 20$ см от центра сферы. Построить график зависимости $E(r)$.

15 Поле создано двумя равномерно заряженными концентрическими сферами радиусами $R_1 = 5$ см и $R_2 = 8$ см. Заряды сфер соответственно равны $q_1 = 2$ нКл и $q_2 = -1$ нКл. Определите напряженность электростатического поля в точках, лежащих от центра сфер на расстояниях: 1) $r_1 = 3$ см; 2) $r_2 = 6$ см; 3) $r_3 = 10$ см. Построить график зависимости $E(r)$.

Контрольные вопросы

1 В чем заключается закон сохранения заряда? Приведите примеры проявления закона.

2 Запишите, сформулируйте и объясните закон Кулона.

3 Какие поля называют электростатическими?

4 Что такое напряженность E электростатического поля? Каково направление вектора напряженности E ? Единица напряженности в СИ.

6 Что такое поток вектора E ? Единица его в СИ?

7 В чем заключается физический смысл теоремы Гаусса для электростатического поля в вакууме?

8 Что такое линейная, поверхностная и объемная плотности зарядов?

9 Как показать, что электростатическое поле является потенциальным?

10 Что называется циркуляцией вектора напряженности?

11 Приведите графики зависимостей $E(r)$ для равномерно заряженной сферической поверхности. Дайте их объяснение и обоснование.

14 ПОТЕНЦИАЛ И РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: разность потенциалов; эквипотенциальная поверхность.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных величин): потенциал поля уединенного проводника, потенциал поля системы проводников; разность потенциалов; потенциал поля, создаваемого точечным зарядом; потенциал электрического поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью.

Уметь графически изобразить эквипотенциальные поверхности однородного электрического поля, электрического поля, создаваемого точечным зарядом, и электрического поля, создаваемого металлической заряженной сферой.

Уметь записать принцип суперпозиции потенциалов.

Уметь записать формулу, определяющую энергию взаимодействия системы точечных зарядов.

Уметь записать формулу, определяющую работу, совершаемую силами электрического поля при перемещении точечного заряда.

Сведения из теории

Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению потенциальной энергии точечного положительного заряда, помещенного в данную точку поля, к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}.$$

Потенциал электрического поля в бесконечности от источника поля условно принимается равным нулю.

Потенциал электрического поля, создаваемый точечным зарядом q на расстоянии r от заряда,

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}.$$

Потенциал электрического поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R и зарядом q на расстоянии r от центра сферы:

а) внутри сферы и на ее поверхности ($r \leq R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{R};$$

в) вне сферы ($r > R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}.$$

Во всех приведенных формулах для потенциала сферы ϵ есть диэлектрическая проницаемость однородного диэлектрика, окружающего сферу.

Потенциал электрического поля, созданного системой зарядов, в данной точке согласно принципу суперпозиции равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых отдельными зарядами q_1, q_2, \dots, q_n :

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Энергия взаимодействия системы точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i,$$

где φ_i – потенциал, создаваемый в той точке, где находится заряд q_i , всеми зарядами, кроме i -го.

Связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi.$$

В случае электрического поля, обладающего центральной или сферической симметрией, эта связь выражается формулой

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}.$$

Для однородного поля, т. е. поля, напряжённость которого в каждой его точке одинакова по модулю и направлению,

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d},$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы точек двух эквипотенциальных поверхностей; d – расстояние между ними вдоль силовой линии.

Работа, совершаемая силами электрического поля при перемещении точечного заряда q из точки 1 в точку 2,

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ или } A = q \int_1^2 E_l dl,$$

где E_l – проекция вектора напряжённости на направление перемещения; dl – модуль перемещения.

В случае однородного поля формула для работы принимает вид

$$A = qEl \cos \alpha,$$

где l – модуль перемещения; α – угол между направлениями векторов напряженности и перемещения.

Задачи для самостоятельного решения

1 Положительные заряды $q_1 = 3$ мкКл и $q_2 = 20$ нКл находятся в вакууме на расстоянии $r_1 = 1,5$ м друг от друга. Определить работу A , которую надо совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния $r_2 = 1$ м.

2 Заряды $q_1 = 1$ мкКл и $q_2 = -1$ мкКл находятся на расстоянии $d = 10$ см. Определите напряженность и потенциал поля в точке, удаленной на расстояние $r = 10$ см от первого заряда и лежащей на линии, проходящей через первый заряд перпендикулярно направлению от q_1 к q_2 .

3 Электрическое поле образовано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии $d = 2$ см друг от друга. К пластинам приложена разность потенциалов $U = 120$ В. Какую скорость v получит электрон под действием поля, пройдя по линии напряженности расстояние $\Delta r = 3$ мм?

4 Электростатическое поле создано положительно заряженной бесконечной нитью. Протон, двигаясь под действием электростатического поля вдоль линии напряженности от нити с расстояния $r_1 = 2$ см до $r_2 = 10$ см, изменил свою скорость от $v_1 = 1$ Мм/с до $v_2 = 5$ Мм/с. Определить линейную плотность τ заряда нити.

5 Электростатическое поле создается положительно заряженной бесконечной плоскостью с постоянной поверхностной плотностью $\sigma = 10$ нКл/м². Какую работу надо совершить для того, чтобы перенести электрон вдоль линии напряженности с расстояния $r_1 = 2$ см до $r_2 = 1$ см.

6 Одинаковые заряды $Q = 10$ нКл расположены в вершинах квадрата со стороной $a = 10$ см. Определите потенциальную энергию системы.

7 Металлический шар радиусом $R = 5$ см несет заряд $Q = 10$ нКл. Определите потенциал поля для точек: 1) на поверхности шара; 2) на расстоянии $r = 2$ см от его поверхности.

8 Электростатическое поле создается равномерно заряженной бесконечной плоскостью с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ нКл/м². Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $x_1 = 20$ см и $x_2 = 50$ см от плоскости.

9 Электростатическое поле создается равномерно заряженной сферой радиусом $R = 5$ см с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ нКл/м². Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $r_1 = 10$ см и $r_2 = 15$ см от центра сферы.

10 Электростатическое поле создается равномерно заряженным шаром радиусом $R = 8$ см с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м³. Определите разность потенциалов между точками, лежащими внутри шара на расстояниях $r_1 = 10$ см и $r_2 = 15$ см от центра шара.

11 Определить линейную плотность заряда бесконечной прямой заряженной нити, если работа сил поля по перемещению точечного заряда $q = 1$ нКл с расстояния $r_1 = 5$ см до расстояния $r_2 = 2$ см в направлении, перпендикулярном нити, равно 50 мкДж.

12 Электрон влетел в однородное поле, создаваемое двумя разноименно заряженными пластинами, посередине между пластинами и параллельно им с начальной скоростью $v_0 = 10$ Мм/с. Расстояние между пластинами $d = 2$ см и длина пластин $l = 10$ см. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к пластинам, чтобы электрон не вылетел из поля.

13 Электрон влетел в однородное поле, создаваемое двумя разноименно заряженными пластинами, параллельно пластинам с начальной скоростью $v_0 = 10$ Мм/с. При вылете из поля направление скорости электрона составляло угол $\alpha = 35^\circ$ с первоначальным направлением скорости. Определить разность потенциалов между пластинами, если длина пластин равна 10 см, а расстояние между ними составляет 2 см.

14 Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью $\sigma = 4$ нКл/м². Определить значение и направление градиента потенциала поля, созданного этой плоскостью.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определения потенциала данной точки электростатического поля и разности потенциалов двух точек поля. Каковы их единицы измерения?
- 2 Приведите графики зависимостей $E(r)$ и $\varphi(r)$ для равномерно заряженной сферической поверхности. Дайте их объяснение и обоснование.
- 3 Какова связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля? Выведите ее и объясните. Каков физический смысл этих понятий?
- 4 Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?

15 ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: индуцированные заряды; электростатическая индукция; уединенный проводник; конденсатор; пробивное напряжение; сегнетоэлектрики; пьезоэлектрики; пироэлектрики; электреты.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения: электроемкость уединенного проводника; электроемкость системы проводников (конденсатора); объемная плотность энергии электростатического поля.

Уметь записать формулы емкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов; формулы емкости при параллельном и последовательном соединении конденсаторов в батарее.

Уметь записать формулы энергии системы заряженного конденсатора и электростатического поля.

Сведения из теории

Электрическая ёмкость уединённого проводника

$$C = \frac{q}{\varphi},$$

где q – заряд, сообщённый проводнику; φ – потенциал уединенного проводника.

Электрическая ёмкость конденсатора

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

где q – заряд, сообщённый одной из обкладок конденсатора; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Электрическая ёмкость:

а) плоского конденсатора –

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость изолятора; S – площадь пластины; d – расстояние между пластинами;

б) уединённой проводящей сферы радиусом R , находящейся в среде с диэлектрической проницаемостью ε , –

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R;$$

в) сферического конденсатора –

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

где r_1 и r_2 – радиусы концентрических сфер;

г) цилиндрического конденсатора –

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln(r_2 / r_1)},$$

где l – длина обкладок конденсатора; r_1 и r_2 – радиусы полых коаксиальных цилиндров.

Ёмкость батареи конденсаторов при последовательном соединении

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

Ёмкость батареи конденсаторов при параллельном соединении

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Энергия электростатического поля плоского конденсатора

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V,$$

где S – площадь одной пластины; U – разность потенциалов между пластинами; V – объём конденсатора.

Объёмная плотность энергии

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2},$$

где E – напряжённость электрического поля в среде с диэлектрической проницаемостью ε ; D – электрическое смещение.

Задачи для самостоятельного решения

1 Определите расстояние между пластинами плоского конденсатора d , если между ними приложена разность потенциалов $U = 150$ В, причем площадь каждой пластины $S = 100$ см², а её заряд $q = 10$ нКл. Диэлектриком является слюда.

2 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь пластин $S = 200$ см², расстояние между ними $d = 1,5$ мм. После отключения конденсатора от источника напряжения в пространство между пластинами внесли парафин. Определите разность потенциалов U_2 между пластинами после внесения диэлектрика. Определите также емкости конденсатора C_1 и C_2 до и после внесения диэлектрика.

3 Решите предыдущую задачу для случая, когда парафин вносится в пространство между пластинами конденсатора при включенном источнике питания.

4 Определите емкость C коаксиального кабеля длиной 10 м, если радиус его центральной жилы $r_1 = 1$ см, радиус оболочки $r_2 = 1,5$ см, а изоляционным материалом служит резина.

5 Определите напряженность электростатического поля E на расстоянии $d = 1$ см от оси коаксиального кабеля, если радиус его центральной жилы $r_1 = 0,5$ см, а радиус оболочки $r_2 = 1,5$ см. Разность потенциалов между центральной жилой и оболочкой $U = 1$ кВ, изолятором служит резина.

6 Сферический конденсатор состоит из двух концентрических сфер радиусами $r_1 = 5$ см и $r_2 = 5,5$ см. Пространство между обкладками конденсатора заполнено трансформаторным маслом. Определите: 1) емкость этого конденсатора; 2) радиус шара, помещенного в масло, который обладает такой же емкостью.

7 Три одинаковых конденсатора один раз соединены последовательно, другой – параллельно. Во сколько раз и когда емкость батареи будет больше?

8 Два плоских воздушных конденсатора одинаковой емкости соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов $U = 300$ В. Определите разность потенциалов U_1 этой системы, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить слюдой.

9 Два плоских воздушных конденсатора соединены последовательно и заряжены до разности потенциалов $U = 9$ В. Емкость конденсаторов соответственно равна $C_1 = 3$ мкФ и $C_2 = 6$ мкФ. Определите разность потенциалов на обкладках каждого конденсатора и их заряды.

10 Электроемкость батареи конденсаторов, образованной двумя последовательно соединенными конденсаторами, $C = 100$ пФ, а заряд $q = 20$ нКл. Определите электроемкость второго конденсатора, а также разности потенциалов на обкладках каждого конденсатора, если электроемкость первого $C_1 = 200$ пФ.

11 Сплошной эбонитовый шар радиусом $R = 5$ см заряжен равномерно с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м³. Определите энергию электростатического поля W , заключенного внутри шара.

12 Сплошной шар из диэлектрика радиусом $R = 5$ см заряжен равномерно с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м³. Определите энергию электростатического поля W , заключенную в окружающем шар пространстве.

13 Плоский воздушный конденсатор электроемкостью $C = 10$ пФ заряжен до разности потенциалов $U_1 = 500$ В. После отключения конденсатора от источника напряжения расстояние между пластинами конденсатора было увеличено в 3 раза. Определите: 1) разность потенциалов U_2 на обкладках конденсатора после их раздвижения; 2) работу внешних сил A по раздвижению пластин.

14 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь пластин $S = 200$ см², расстояние между ними $d_1 = 1,5$ мм. Пластины раздвинули до расстояния $d_2 = 15$ мм. Найдите энергии W_1 и W_2 конденсатора до и после раздвижения пластин, если источник ЭДС перед раздвижением: 1) отключался; 2) не отключался.

15 К пластинам плоского конденсатора приложена разность потенциалов $U = 100$ В. Площадь пластин $S = 200$ см², расстояние между ними $d = 0,5$ мм, пространство между ними заполнено парафином. Определите силу притяжения пластин друг к другу.

Контрольные вопросы

- 1 Каковы напряженность и потенциал поля, а также распределение зарядов внутри и на поверхности заряженного проводника?
- 2 На чем основана электростатическая защита?
- 3 Может ли электростатика ответить на вопрос: где локализована энергия и что является ее носителем – заряды или поле? Почему?
- 4 Зависит ли емкость проводника (системы проводников) от заряда, сообщенного этому проводнику? От разности потенциалов источника, к которому он подключен?
- 5 Выведите формулы для энергии заряженного конденсатора, выражая ее через заряд на обкладках конденсатора и через напряженность поля.

16 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: электрический диполь; поляризация диэлектрика; электронная или деформационная поляризация диэлектрика; ориентационная, дипольная поляризация диэлектрика; ионная поляризация диэлектрика; диэлектрическая восприимчивость вещества; свободные и связанные заряды; диэлектрическая проницаемость среды.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и направление (для векторных величин): дипольный момент; плечо диполя; поляризованность; поверхностная плотность зарядов; диэлектрическая проницаемость; диэлектрическая восприимчивость; вектор электрического смещения.

Уметь записать формулу напряженности и потенциала поля диполя в точке, лежащей на оси диполя, и в точке, лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины.

Уметь записать следующие формулы: формула связи поляризованности с напряжённостью поля в диэлектрике; формула связи диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью диэлектрика; формула связи напряженности поля внутри диэлектрика с напряженностью внешнего поля.

Уметь записать формулу, устанавливающую связь между величинами \vec{D} , \vec{E} и \vec{P} .

Уметь воспроизвести и описать теорему Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.

Сведения из теории

Диполем называется система двух равных по величине и противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния от центра диполя до точек наблюдения.

Вектор \vec{l} , проведённый от отрицательного заряда диполя к его положительному заряду, называется плечом диполя.

Электрический момент диполя

$$\vec{p} = |q|\vec{l}.$$

Напряжённость и потенциал поля диполя в точке:

а) лежащей на оси диполя, –

$$E = \frac{P}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^3}; \quad \varphi = \frac{P}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^2},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; r – модуль радиус-вектора, проведённого от центра диполя к рассматриваемой точке поля.

б) лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины, –

$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3}; \quad \varphi = 0.$$

Механический момент, действующий на диполь в однородном электрическом поле,

$$\vec{M} = [\vec{p} \vec{E}] \quad \text{или} \quad M = pE \sin \alpha,$$

где α – угол между направлениями векторов дипольного момента и напряжённости поля.

Вектор поляризации или поляризованность

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i,$$

где \vec{p}_i – электрический момент i -й молекулы; N – число молекул, содержащихся в объёме ΔV .

Связь поляризованности с напряжённостью поля в диэлектрике

$$\vec{P} = \chi\epsilon_0\vec{E},$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью

$$\varepsilon = 1 + \chi.$$

Напряжённость среднего макроскопического поля в диэлектрике связана с напряжённостью E_0 внешнего поля соотношениями

$$E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0} \quad \text{или} \quad E = \frac{E_0}{\varepsilon}.$$

Электрическое смещение связано с напряжённостью поля соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}.$$

Связь между \vec{D} , \vec{E} и \vec{P}

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в веществе: поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую заряды q_1, q_2, \dots, q_n ,

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n q_i,$$

где D_n – проекция вектора электрического смещения на направление нормали к элементу поверхности; $\sum q_i$ – алгебраическая сумма свободных зарядов, заключённых внутри замкнутой поверхности; n – число зарядов.

Поток вектора электрического смещения определяется аналогично потоку вектора напряжения электрического поля.

Задачи для самостоятельного решения

1 Определите напряжённость поля E , создаваемого диполем с электрическим моментом $p = 10^{-9}$ Кл·м на расстоянии $r = 25$ см от центра диполя в направлении, перпендикулярном оси диполя.

2 Расстояние между зарядами диполя $q = \pm 3$ нКл равно 12 см. Найти напряжённость поля E , созданного диполем в точке, удаленной на расстояние $d = 8$ см как от первого, так и от второго заряда.

3 Диполь с электрическим моментом $p = 0,12$ нКл·м образован двумя точечными зарядами $q = \pm 1$ нКл. Найти напряжённость E и потенциал φ электрического поля, созданного в точке, лежащей на оси диполя на расстоянии $d = 8$ см от центра диполя.

4 Чему равно отношение напряженностей электростатических полей в точке A , лежащей на продолжении оси диполя, и в точке B , лежащей на перпендикуляре, проходящем через середину O оси этого диполя, если $OA = OB$?

5 Определите поверхностную плотность зарядов σ на пластинах плоского слюдяного конденсатора, заряженного до разности потенциалов $U = 300$ В, если расстояние между пластинами равно $d = 1$ мм.

6 В однородном электрическом поле напряженностью $E_0 = 700$ В/м помещается перпендикулярно полю бесконечная плоскопараллельная стеклянная пластина. Определите: 1) напряженность E электростатического поля внутри пластины; 2) электрическое смещение D внутри пластины; 3) поляризованность стекла P ; 4) поверхностную плотность связанных зарядов на стекле σ' .

7 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено парафином. Расстояние между пластинами $d = 8,85$ мм. Какую разность потенциалов $\Delta\phi$ необходимо подать на пластины, чтобы поверхностная плотность связанных зарядов на парафине составляла $0,1$ нКл/см².

8 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 5$ мм. После зарядки конденсатора до разности потенциалов $U = 500$ В между пластинами конденсатора вдвинули стеклянную пластину. Определите: 1) диэлектрическую восприимчивость стеклянной пластины χ ; 2) поверхностную плотность связанных зарядов на стекле σ' .

9 Определите поверхностную плотность σ' связанных зарядов на стеклянной пластинке толщиной $d = 1$ мм, служащей изолятором плоского конденсатора, если разность потенциалов между обкладками конденсатора $U = 300$ В.

10 Между обкладками плоского конденсатора помещено два слоя диэлектрика – слюдяная пластинка толщиной $d_1 = 1$ мм и парафин толщиной $d_2 = 0,5$ мм. Определите: 1) напряженность электростатических полей в слоях диэлектрика; 2) электрическое смещение, если разность потенциалов между пластинами конденсатора $U = 500$ В.

11 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 1$ см, разность потенциалов $U = 200$ В. Определить поверхностную плотность σ' связанных зарядов эбонитовой пластинки толщиной $d = 8$ мм, помещенной на нижнюю пластину конденсатора.

12 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 5$ мм, разность потенциалов $U = 1,2$ кВ. Определите: 1) поверхностную

плотность зарядов на пластинах конденсатора σ ; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на диэлектрике, если известно, что диэлектрическая восприимчивость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами, $\chi = 1$.

13 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено стеклом. Расстояние между пластинами $d = 5$ мм, разность потенциалов $U = 1$ кВ. Определите напряженность поля в стекле E ; поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора σ ; поверхностную плотность связанных зарядов на стекле σ' .

14 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено слюдой. Их площадь составляет 50 см^2 . Определите поверхностную плотность связанных зарядов на слюде σ' , если пластины конденсатора притягивают друг друга с силой 1 мН .

15 В однородное электростатическое поле напряженностью $E_0 = 700 \text{ В/м}$ перпендикулярно полю поместили стеклянную пластину толщиной $d = 1,5$ мм и площадью $S = 200 \text{ см}^2$. Определите: 1) поверхностную плотность зарядов на стекле; 2) энергию электростатического поля, сосредоточенную в пластине.

Контрольные вопросы

- 1 Электрический диполь помещен внутри замкнутой поверхности. Каков поток Φ_E сквозь эту поверхность?
- 2 Что такое поляризованность?
- 3 Что показывает диэлектрическая проницаемость среды?
- 4 Выведите связь между диэлектрическими восприимчивостью вещества и проницаемостью среды.
- 5 В чем различие поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
- 6 Как определяется вектор электрического смещения? Что он характеризует?
- 7 Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
- 8 Выведите и прокомментируйте условия для векторов E и D на границе раздела двух диэлектрических сред.

17 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СТОРОННИЕ СИЛЫ. ЭДС. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: электродинамика; электрический ток; ток проводимости; конвекционный ток; постоянный ток; источник тока; сторонние силы; сверхпроводимость.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: сила тока; плотность тока; электродвижущая сила; напряжение; электрическая проводимость проводника; удельное электрическое сопротивление; удельная электрическая проводимость вещества проводника; работа тока; мощность тока; удельная тепловая мощность тока.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон Ома для участка цепи; закон Ома в дифференциальной форме; закон Джоуля – Ленца; закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме; обобщенный закон Ома; закон Ома для замкнутой цепи.

Уметь записать формулу зависимости удельного сопротивления, сопротивления проводника от температуры.

Уметь записать формулу и дать определение первого и второго правил Кирхгофа.

Сведения из теории

Сила тока определяется количеством электричества, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Плотность тока есть векторная величина, измеряемая отношением силы тока к единице площади поперечного сечения проводника:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{k},$$

где \vec{k} – единичный вектор, совпадающий по направлению с направлением движения положительных зарядов.

Плотность тока в проводнике

$$\vec{j} = nq \langle \vec{v} \rangle,$$

где n – концентрация носителей заряда; $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения зарядов в проводнике.

Закон Ома:

а) для однородного участка цепи (т. е. не содержащего ЭДС) –

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R};$$

б) для неоднородного участка цепи –

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R};$$

в) для замкнутой цепи –

$$I = \frac{\varepsilon}{R},$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов на концах участка цепи; ε_{12} – ЭДС источников тока, входящих в участок; R – сопротивление цепи (участка цепи); ε – ЭДС всех источников тока цепи.

Закон Ома в дифференциальной форме: плотность тока пропорциональна напряжённости электрического поля в данной точке проводника:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где $\gamma = 1/\rho$ – удельная проводимость материала проводника.

Сопротивление однородного проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление материала; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения.

Зависимость удельного сопротивления от температуры

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где ρ_0 и ρ – удельные сопротивления, соответственно, при 0°C и при температуре t (по шкале Цельсия); α – температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление проводников:

а) при последовательном соединении –

$$R = \sum_{i=1}^n R_i$$

б) при параллельном соединении –

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

где n – число проводников; R_i – сопротивление i -го проводника.

Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей:

1) алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

где n – число токов, сходящихся в узле;

2) для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k,$$

где n – число участков, содержащих активное сопротивление; I_i – сила тока на i -м участке цепи; R_i – сопротивление i -го участка; m – число участков, содержащих источники тока; ε_k – ЭДС источников тока на k -м участке.

Работа, совершаемая электростатическим полем и сторонними силами в участке цепи постоянного тока за время t ,

$$A = IUt.$$

Мощность тока

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Закон Джоуля – Ленца определяется соотношением

$$Q = I^2 R t = UIt = \frac{U^2}{R} t,$$

где Q – количество теплоты, выделяющееся в участке цепи постоянного тока за время t .

Закон Джоуля – Ленца справедлив при условии, что участок неподвижен и в нём не протекают химические реакции.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме:

$$w = jE = \gamma E^2,$$

где w – удельная тепловая мощность тока, т. е. количество теплоты, выделяемое в единицу времени в единице объема проводника при протекании в нем тока.

Задачи для самостоятельного решения

1 По медному проводнику сечением $0,8 \text{ мм}^2$ течет ток силой 80 мА . Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника, предполагая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.

2 По алюминиевому проводу сечением $0,2 \text{ мм}^2$ течет ток $0,2 \text{ А}$. Определите силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля.

3 Определите, за какое время сила тока равномерно возрастает от $I_0 = 0 \text{ А}$ до $I = 2 \text{ А}$, если заряд, прошедший по проводнику, равен 5 Кл .

4 Плотность электрического тока в медном проводе равна 10 А/см^2 . Определите удельную тепловую мощность тока.

5 Определите ЭДС и внутреннее сопротивление r источника тока, если во внешней цепи при силе тока $I_1 = 4 \text{ А}$ выделяется мощность $P_1 = 10 \text{ Вт}$, а при силе тока $I_2 = 2 \text{ А}$ – мощность $P_2 = 8 \text{ Вт}$.

6 Сила тока в проводнике равномерно возрастает от $I_1 = 0$ до $I_2 = 2 \text{ А}$ за 5 с . Определите заряд, прошедший по проводнику.

7 Определите плотность тока, если за 2 с через проводник сечением $1,6 \text{ мм}^2$ прошло $2 \cdot 10^{19}$ электронов.

8 Лампочка и реостат, соединенные последовательно, присоединены к источнику тока. Напряжение на зажимах лампочки равно 40 В , сопротивление реостата составляет 10 Ом . Внешняя цепь потребляет мощность 120 Вт . Найти силу тока в цепи.

9 Вольтметр, включенный в сеть последовательно с сопротивлением R_1 , показал напряжение $U_1 = 198 \text{ В}$, а при включении последовательно с сопротивлением $R_2 = 2R_1$ показал напряжение $U_2 = 180 \text{ В}$. Определите сопротивление R_1 и напряжение в сети, если сопротивление вольтметра $r = 900 \text{ Ом}$.

10 Сила тока в цепи, содержащей три параллельно соединенных сопротивления R_1 , $R_2 = 2 \text{ Ом}$ и $R_3 = 6 \text{ Ом}$, равна $I = 1,5 \text{ А}$. Сила тока через сопротивление R_1 равна $I_1 = 0,5 \text{ А}$. Определите силы токов I_2 и I_3 , протекающих через сопротивления R_2 и R_3 .

11 Два цилиндрических проводника одинаковой длины и сечения, один из меди, а другой из железа, соединены последовательно. Определите отношение мощностей токов для этих проводников.

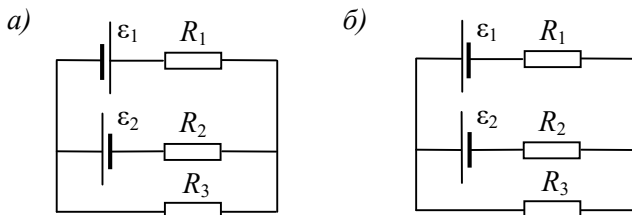
12 Определите ток короткого замыкания источника ЭДС, если при внешнем сопротивлении $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ток в цепи равен $I_1 = 0,2 \text{ А}$, а при $R_2 = 110 \text{ Ом}$ ток в цепи составляет $I_2 = 0,1 \text{ А}$.

13 Через лампу накаливания течет ток, равный $0,6 \text{ А}$. Температура вольфрамовой нити диаметром $0,1 \text{ мм}$ равна $2200 \text{ }^\circ\text{C}$. Ток подводится медным проводом сечением 6 мм^2 . Определите напряженность электрического поля: 1) в вольфраме; 2) в меди.

14 Электрическая плитка мощностью 1 кВт с нихромовой спиралью предназначена для включения в сеть с напряжением 220 В .

Сколько метров проволоки диаметром 0,5 мм надо взять для изготовления спирали, если температура нити равна 900 °С?

15 Две батареи аккумуляторов ($\varepsilon_1 = 15$ В, $r_1 = 1,5$ Ом; $\varepsilon_2 = 12$ В, $r_2 = 3$ Ом) и реостаты ($R_1 = 1,5$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 9$ Ом) соединены так, как показано на рисунке а. Найти силу тока в батарее и реостатах.



16 Две батареи аккумуляторов ($\varepsilon_1 = 10$ В, $r_1 = 1$ Ом; $\varepsilon_2 = 8$ В, $r_2 = 2$ Ом) и реостаты ($R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 6$ Ом) соединены так, как показано на рисунке б. Найти силу тока в батарее и реостатах.

Контрольные вопросы

- 1 Что называют силой тока? Плотностью тока? Каковы их единицы измерения? Дать определения.
- 2 Назовите условия возникновения и существования электрического тока.
- 3 Что такое сторонние силы? Какова их природа?
- 4 В чем заключается физический смысл электродвижущей силы, действующей в цепи? Напряжения? Разности потенциалов?
- 5 Почему напряжение является обобщенным понятием разности потенциалов?
- 6 Какова связь между сопротивлением и проводимостью, удельным сопротивлением и удельной проводимостью?
- 7 В чем заключается явление сверхпроводимости? Каковы его перспективы?
- 8 На чем основано действие термометров сопротивления?
- 9 Выведите законы Ома и Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.
- 10 В чем заключается физический смысл удельной тепловой мощности тока?
- 11 Проанализируйте обобщенный закон Ома. Какие частные законы можно из него получить?
- 12 Как формулируются правила Кирхгофа? На чем они основаны?
- 13 Как составляются уравнения, выражающие правила Кирхгофа?

18 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ, ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

Требования к исходному уровню знаний и умений

Знать определения следующих физических понятий: электронный газ; работа выхода электрона; двойной электрический слой; электронная эмиссия; термоэлектронная, фотоэлектронная, вторичная и

автоэлектронная эмиссии; ток насыщения; ионизация газов; газовый разряд; процесс рекомбинации; самостоятельный и несамостоятельный газовые разряды; напряжение пробоя; тлеющий, искровой, дуговой и коронный разряды; стримеры; плазма; степень ионизации.

Знать определения следующих физических величин, уметь записать формулы, которыми они определяются, указать единицы измерения и значения: поверхностный скачок потенциала.

Знать формулировку, уметь записать формулы, определяющие следующие физические законы: закон Видемана – Франца.

Уметь воспроизвести среднюю скорость теплового движения электронов из теории Друде – Лоренца.

Уметь оценить среднюю скорость упорядоченного движения электронов.

Уметь вывести на основе классической теории электропроводности металлов дифференциальную форму законов Ома и Джоуля – Ленца.

Сведения из теории

Средняя скорость теплового движения электронов

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}},$$

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; m_e – масса электрона.

Средняя скорость направленного движения электрона

$$\langle v \rangle = \frac{eE \langle t \rangle}{2m_e},$$

где e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля; $\langle t \rangle$ – среднее время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами решетки.

Среднее время свободного пробега $\langle t \rangle$ определяется средней длиной свободного пробега $\langle l \rangle$ и средней скоростью движения электронов относительно кристаллической решетки проводника, равной $\langle u \rangle + \langle v \rangle$. Так как $\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$, то

$$\langle t \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle u \rangle}.$$

Плотность тока в металлическом проводнике

$$j = ne\langle v \rangle = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle u \rangle} E,$$

где n – концентрация электронов, т. е. получили закон Ома в дифференциальной форме.

Закон Джоуля – Ленца электрического тока в классической теории проводимости металлов

$$\langle E_k \rangle = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{e^2 \langle l \rangle^2}{2m \langle u \rangle^2} E^2.$$

Закон Видемана – Франца: отношение теплопроводности (λ) к удельной проводимости (γ) для всех металлов при одной и той же температуре одинаково и увеличивается пропорционально термодинамической температуре:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T, \quad \beta = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2,$$

где β – постоянная, не зависящая от рода металла; k – постоянная Больцмана.

Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

$$j = qn(u_+ + u_-)E,$$

где q – заряд иона; n – концентрация ионов; u_+ , u_- – подвижности положительных и отрицательных ионов.

Плотность тока насыщения в газе между плоскими электродами

$$j_n = q\Delta n d, \quad \Delta n = \frac{N}{Vt},$$

где q – заряд иона; Δn – число пар ионов, создаваемых ионизатором в единицу времени в единице объёма газа, d – расстояние между электродами.

Зависимость термоэлектронного тока I от анодного напряжения в области малых положительных значений U описывается законом трех вторых

$$I = BU^{3/2},$$

где B – коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, а также от их взаимного расположения.

Плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии (удельная эмиссия) определяется формулой

$$j_{\text{н}} = BT^2 \exp\left(-\frac{A}{kT}\right),$$

где B – эмиссионная постоянная; A – работа выхода электрона из металла; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Задачи для самостоятельного решения

1 Плотность тока в алюминиевом проводе 1 А/мм^2 . Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов, предполагая, что число свободных электронов в 1 см^3 алюминия равно числу атомов.

2 Плотность тока в медном проводнике $j = 3 \text{ А/мм}^2$. Найти напряженность E электрического поля в проводнике.

3 В медном проводнике длиной $l = 2 \text{ м}$ и площадью поперечного сечения $S = 0,4 \text{ мм}^2$ идет ток. При этом каждую секунду выделяется количество теплоты $Q = 0,35 \text{ Дж}$. Сколько электронов N проходит за 1 с через поперечное сечение этого проводника?

4 Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объем $V = 375 \text{ см}^3$ и заполнено частично ионизированным водородом. Площадь пластин конденсатора $S = 250 \text{ см}^2$. При каком напряжении U между пластинами конденсатора сила тока, протекающего через конденсатор, достигнет значения $I = 2 \text{ мкА}$, если концентрация ионов обоих знаков в газе равна $5,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$?

5 Найти сопротивление R трубки длиной $l = 84 \text{ см}$ и площадью поперечного сечения $S = 5 \text{ мм}^2$, если она заполнена воздухом, ионизированным так, что в единице объема при равновесии находится $n = 10^{13} \text{ м}^{-3}$ однозарядных ионов каждого знака.

6 При какой температуре T атомы ртути имеют кинетическую энергию поступательного движения, достаточную для ионизации? Потенциал ионизации атома ртути $U = 10,4 \text{ В}$.

7 Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизировать атом водорода? Потенциал ионизации атома водорода $U = 13,5 \text{ В}$.

8 Определить толщину слоя меди, выделившейся за время $t = 5 \text{ ч}$ при электролизе медного купороса, если плотность тока $j = 80 \text{ А/м}^2$.

9 В электролитической ванне через раствор прошел заряд $q = 193$ кКл. При этом на катоде выделился металл количеством вещества $\nu = 1$ моль. Определить валентность Z металла.

10 Азот ионизируется рентгеновским излучением. Найти проводимость азота, если в одном кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия 10^7 пар одновалентных ионов.

11 В ионизационной камере с расстоянием между плоскими электродами $d = 5$ см установился ток насыщения плотностью $j = 16$ мкА/м². Определить число пар ионов Δn , образующихся в каждом кубическом сантиметре пространства камеры в секунду.

12 Работа выхода электрона из металла $A = 2,5$ эВ. Определите скорость вылетающего электрона, если он обладает энергией $W = 10^{-18}$ Дж.

13 К электродам разрядной трубки приложена разность потенциалов $U = 5$ В, расстояние между ними $d = 10$ см. Газ, находящийся в трубке, однократно ионизирован. Число ионов каждого знака в единице объема газа $n = 10^8$ м⁻³, подвижности ионов $u_+ = 3 \cdot 10^{-2}$ м²/(В·с) и $u_- = 3 \cdot 10^2$ м²/(В·с). Найти плотность тока j в трубке. Какая часть полного тока переносится положительными ионами?

14 Площадь каждого электрода ионизационной камеры $S = 0,01$ м², расстояние между ними $d = 6,2$ см. Найти ток насыщения в такой камере, если в единице объема в единицу времени образуется 10^{15} пар однозарядных ионов.

Контрольные вопросы

1 Какими опытами была выяснена природа носителей электрического тока в металлах?

2 Каковы основные идеи теории Друде – Лоренца?

3 Сравните порядок средних скоростей теплового и упорядоченного движения электронов в металлах (при условиях, близких к нормальным и приемлемым в электротехнике).

4 Почему тепловое движение электронов не может привести к возникновению электрического тока?

5 Выведите на основе классической теории электропроводности металлов дифференциальную форму законов Ома и Джоуля – Ленца.

6 Как классическая теория проводимости металлов объясняет зависимость сопротивления металлов от температуры?

7 В чем заключаются трудности элементарной классической теории электропроводности металлов? Каковы границы ее применения?

8 Какие существуют разновидности эмиссионных явлений? Дайте их определения.

9 Объясните вольт-амперную характеристику вакуумного диода.

- 10 Что называют работой выхода электрона?
- 11 Можно ли изменять силу тока насыщения вакуумного диода? Если да, то как?
- 12 Каким образом можно вырвать электроны из холодного катода? Как называется это явление?
- 13 Дайте объяснение качественной зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии диэлектрика от энергии падающих электронов.
- 14 Охарактеризуйте типы самостоятельного газового разряда. В чем их особенности?
- 15 К какому типу газового разряда относится молния?
- 16 Может ли возникнуть ток насыщения при самостоятельном газовом разряде?
- 17 Охарактеризуйте процесс ионизации; рекомбинации.
- 18 В чем отличие самостоятельного газового разряда от несамостоятельного? Каковы условия, необходимые для его осуществления?
- 19 В чем отличие равновесной плазмы от неравновесной? Приведите основные свойства плазмы. Каковы возможности ее применения?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – М. : Изд. центр «Академия», 2007. – 560 с.
- 2 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 608 с.
- 3 **Савельев, И. В.** Курс общей физики : учеб. : в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 1–3.
- 4 Физика для вузов / И. И. Наркевич и [др.]. – Минск : Выш. шк., 1994. – Т. 1–2.
- 5 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – 11-е изд., перераб. – М. : Наука, 1985. – 381 с.
- 6 **Чертов, А. Г.** Физические величины: (Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 334 с.
- 7 **Трофимова, Т. И.** Сборник задач по курсу физики для втузов : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – 3-е изд. – М. : ОНИКС-21 век; Мир и Образование, 2005. – 383 с.
- 8 **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1977–1990. – Т. 1–5.
- 9 **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 624 с.
- 10 **Савельев, И. В.** Сборник задач и вопросов по общей физике / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1988. – 288 с.
- 11 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике : учеб. пособие / И. Е. Иродов. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 416 с.
- 12 **Деликатная, И. О.** Физика : учеб.-метод. пособие для студентов специальности «Транспортная логистика (по направлениям)» : в 2 ч. Ч. 1. Механика. Молекулярная физика / И. О. Деликатная, И. В. Приходько. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 64 с.
- 13 **Шиляева, К. П.** Физика. Краткая теория и задачи : пособие / К. П. Шиляева, И. О. Деликатная, Н. А. Ахраменко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 211 с.

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

Раздел 1

1. $\vec{v} = 3t^2\vec{i} + 6t\vec{j}$; $\vec{a} = 6t\vec{i} + 6\vec{j}$; $v = 6,7$ м/с; $a = 8,48$ м/с². 2. $t = 4$ с; $v = 3,4$ м/с; $x = 3,6$ м. 3. $a_\tau = 6$ м/с²; $s = 85$ м; $a = 17,1$ м/с².
4. $a_n = 5,97$ м/с²; $a_\tau = 7,77$ м/с²; $R = 102$ м. 5. $H = 2,87$ м; $s = 19,9$ м; $t = 1,53$ с. 6. $\alpha = 45^\circ$. 7. $a_n = 9,47$ м/с²; $a_\tau = 2,58$ м/с²; $a = 9,82$ м/с².
8. $S = 72$ м. 9. $S = 24$ м. 10. $H = 80$ м. 11. $H = 120$ м. 12. $a = 4$ м/с².
13. $t_1 = 1$ с; $t_2 = 3$ с. 14. $v_0 = 20$ м/с.

Раздел 2

1. $\sigma = 3,12$ МПа. 2. $\sigma = 78,5$ МПа; $\varepsilon = 3,90 \cdot 10^{-4}$; $\Delta l = 1,2$ мм.
3. $E = 208$ ГПа. 4. $E = 196$ ГПа. 5. $l = 111$ м. 6. $g_n = 1,61$ м/с².
7. $g = 0,21$ м/с². 8. $h = 1,69$ Мм. 9. $\omega = 7,27 \cdot 10^{-5}$ рад/с; $R = 42,2$ Мм.
10. $T_1 = 5,9$ Н; $T_2 = 3,9$ Н. 11. $\mu = 0,58$. 12. $v = 7,26$ м/с. 13. $F = 3$ Н.
14. $a = 4,17$ м/с²; $T = 2,82$ Н. 15. $F = -0,8$ Н; $F = -8$ Н; $t = 1,67$ с.
16. $n = 59$ об/мин. 17. $R = 1600$ м. 18. $n = 0,16$ об/с. 19. $F = 6$ кН.
20. $F = 0,1$ Н; $\alpha = 11^\circ 35'$.

Раздел 3

1. 1) $u_1 = 6,3$ м/с; 2) $u_2 = -0,57$ м/с. 2. 1) 1; 2) 0,36. 3. $v_2 = 900$ м/с.
4. $s = 4l$. 5. $v = 26$ м/с. 6. $v = 835$ м/с. 7. $u = 1,55$ м/с. 8. 1) $x_c = 30$ см;
2) $x_c = 7,5$ см, $y_c = 4,5$ см; 3) $x_c = 7,5$ см, $y_c = 4,5$ см, $z_c = 3$ см.
9. 1) $v = 3,8$ м/с; 2) $v_{\max} = 6$ м/с. 10. $a = 11,6$ м/с². 11. $t = 0,66$ с;
 $v_2 = 220$ м/с

Раздел 4

1. $A = 1,48$ Дж. 2. $h = 30,6$ м. 3. $Q = 3$ Дж. 4. 1) $T = 39,2$ Дж;
2) $\Pi = 59,2$ Дж. 5. 1) $n = 3$; 2) $T = 600$ Дж. 6. $N = 16$ Вт. 7. $\varphi = 37^\circ$.
8. $h = 3,7$ см. 9. $h = 15$ см. 10. 1) $T = 0,24$ Дж; 2) $S = 1,53$ м.
11. $a_\tau = 0,1$ м/с². 12. $h = 40$ см. 13. $h = 15$ м. 14. $A = 2,5$ Дж.
15. $A = 15,4$ Дж. 16. $\Pi = 2,5$ Дж.

Раздел 5

1. $\varepsilon = 12,5$ рад/с². 2. $\varepsilon = 0,157$ рад/с²; $N = 300$. 3. $a = 2,06$ м/с².
4. $a_n = 1,5$ см/с². 5. $a_\tau = 6$ м/с²; $s = 85$ м; $a = 17,1$ м/с². 6. $a_\tau = 1,4$ м/с²,
 $a_n = 28,9$ м/с², $a = 28,9$ м/с². 7. $a_\tau = 1,2$ м/с², $a_n = 168$ м/с², $a \approx 168$ м/с².
8. 1) $\omega = 2$ рад/с; 2) $\varepsilon = 1$ рад/с²; 3) $a_\tau = 0,8$ м/с², $a_n = 3,2$ м/с²,
 $a = 3,3$ м/с². 9. $t = 2$ с. 10. $a = 2,5$ м/с².

Раздел 6

1. 1) $J = 3 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; 2) $J = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. 2. $J = 0,12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.
3. $M = -0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$. 4. $M = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $J = 15,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. 5. $M = 16 \text{ Н} \cdot \text{м}$.
6. $m = 16 \text{ кг}$. 7. $J = 0,259 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. 8. $t = 0,585 \text{ с}$. 9. 1) $J = 6,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
2) $m = 50 \text{ кг}$. 10. 1) $t = 2 \text{ с}$; 2) $T = 4,31 \text{ Н}$; 3) $E_k = 1,32 \text{ Дж}$.
11. 1) $a = 1,96 \text{ м/с}^2$; 2) $T_2/T_1 = 1,05$. 12. 1) $a = 2,45 \text{ м/с}^2$; 2) $T_1 = 1,1 \text{ Н}$;
 $T_2 = 1,47 \text{ Н}$. 13. $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$. 14. $n_2 = 23 \text{ мин}^{-1}$.

Раздел 7

1. 2,29. 2. $\beta = 0,141$. 3. $v = 1,31 \cdot 10^5 \text{ км/с}$. 4. $l_0 = 1,79 \text{ м}$. 5. $u = 0,976 \text{ с}$.
6. с. 7. 1,67. 8. 51,2 %. 9. $v = 0,866 \text{ с}$. 10. $p = 6,68 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.
11. $v = 0,943 \text{ с}$. 12. $v = 298 \text{ Мм/с}$. 13. $v = 260 \text{ Мм/с}$.
14. $p = 5,68 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$; $T = 7,69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. 15. $T = 1,02 \text{ МэВ}$.
16. $U = 1,22 \text{ ГВ}$.

Раздел 8

1. $\nu = 2,5 \cdot 10^2 \text{ моль}$; $N = 1,5 \cdot 10^{26}$. 2. $m = 0,26 \text{ кг}$. 3. $m_1 = 16 \text{ г}$; $m_2 = 8 \text{ г}$.
4. $T = 400 \text{ К}$. 5. $p_2 = 3,63 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 6. $n = 6,27 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$; $N = 18,8 \cdot 10^{22}$.
7. $p = 0,75 \text{ МПа}$; $\mu = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$. 8. $\Delta p = 133 \text{ Па}$. 9. $F = 32,3 \text{ кН}$.
10. $m_1 = 6,87 \text{ г}$; $m_2 = 4,81 \text{ г}$. 11. $m = 6,2 \text{ кг}$. 12. $p = 2,66 \text{ кПа}$. 13. Увели-
чится в 4 раза. 14. $T = 7250 \text{ К}$; $\langle \varepsilon_{\text{II}} \rangle = 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. 15. $p = 768 \text{ Па}$.

Раздел 9

1. $v_B = 422 \text{ м/с}$, $\langle v \rangle = 476 \text{ м/с}$, $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 517 \text{ м/с}$. 2. $T = 381 \text{ К}$.
3. $v_B = 478 \text{ м/с}$. 11. $h = 4,22 \text{ км}$. 12. В $e^{23,6}$ раза. 13. $p = 1,12 p_0$.
14. 0,778. 15. 0,4 %.

Раздел 10

1. $\langle \varepsilon_{\text{вп}} \rangle = 3,94 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$; $W_{\text{вп}} = 296 \text{ Дж}$. 2. $\langle \varepsilon_I \rangle = 6,9 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$;
 $\langle \varepsilon_{\text{II}} \rangle = 20,7 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$; $\langle \varepsilon_{\text{вп}} \rangle = 13,8 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$; $\langle \varepsilon \rangle = 34,5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$.
3. $Q = 291 \text{ кДж}$; $\Delta U = 208 \text{ кДж}$; $A = 83 \text{ кДж}$. 4. 1) $Q_1 = 3,5 \text{ кДж}$;
2) $Q_2 = 2,5 \text{ кДж}$. 5. 1) гелий; 2) $V_m = 1,25 \text{ м}^3/\text{кг}$. 6. 1) $Q_1 = 1 \text{ кДж}$;
2) $Q_2 = 3,5 \text{ кДж}$. 7. 1) $\Delta U = -4,03 \text{ кДж}$; 2) $A = 4,03 \text{ кДж}$.
8. 1) $V_2 = 0,228 \text{ м}^3$; 2) $T_2 = 411 \text{ К}$; 3) $\Delta U = 82,4 \text{ кДж}$.
9. 1) $c_V = 742 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; 2) $c_p = 1,04 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.
10. $c_V = 649 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_p = 909 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. 11. $c_V = 667 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;
 $c_p = 917 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. 12. $\gamma = 1,55$. 13. 1) $Q_1 = 3,5 \text{ кДж}$; 2) $Q_2 = 2,5 \text{ кДж}$.

Раздел 11

1. $\Delta S = 3,6 \text{ Дж/К}$. 2. 1) $\Delta S_1 = 28,8 \text{ Дж/К}$; 2) $\Delta S_2 = 40,3 \text{ Дж/К}$.
3. $\Delta S = 11,5 \text{ Дж/К}$. 4. $\Delta S = 7,4 \text{ Дж/К}$. 5. $\Delta S = -20,2 \text{ Дж/К}$.
6. $A_{\text{сж}} = -240 \text{ Дж}$. 7. 1) $\eta = 40 \%$; 2) $Q_2 = 1,2 \text{ кДж}$. 8. $\eta = 34,3 \%$.

9. $\eta = 13,3\%$. 10. $\eta = 30,7\%$. 11. 1) $\eta = 30\%$; 2) $A = 1,5$ Дж.
12. $\eta = 37\%$;

Раздел 12

1. $\langle l \rangle = 1,55$ мкм. 2. $z = 3,7 \cdot 10^9$ с⁻¹. 3. $\langle l \rangle = 13,3$ нм. 4. $\langle l \rangle = 1,55$ нм.
5. $\rho = 1,55$ мг/м³. 6. В 1,25 раз. 7. $D = 8,89 \cdot 10^{-6}$ м²/с.
8. $\eta = 1,29 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с). 9. $\lambda = 7,42$ мВт/(м·К). 10. $\Delta Q = 76,4$ Дж.
11. $\Delta m = 15,6$ мг. 12. 1) $q_1 = 196$ Вт/м²; 2) $q_2 = 35$ Вт/м².
13. $\sigma = 62,5$ мН/м. 14. $d = 1,6$ мм. 15. $p = 118$ кПа. 16. 1) $T_1 = 302$ К;
2) $T_2 = 301$ К. 17. 1) $p_1 = 3,32$ МПа; 2) $p_2 = 4,02$ МПа. 18. $p' = 544$ кПа;
 $V' = 79,3$ см³. 19. $\Delta U = 154$ Дж. 20. $\langle l \rangle = 95,1$ м, $\langle l \rangle \gg l_0$.
21. 1) $C_1 = 1,08$ кДж/(кг·К); 2) $C_2 = 0,924$ кДж/(кг·К).

Раздел 13

1. $q = 0,361$ нКл. 2. $E_1 = 0,6$ кВ/м; $E_2 = 0,2$ кВ/м. 3. $E = 2$ кВ/м.
4. $F = 1,5$ мН. 5. $\rho = 1,6$ г/см³. 6. $Q = 1,15$ нКл. 7. $q = 16,1$ нКл.
8. $E = 10,1$ кВ/м. 9. $E_1 = 0$; $E_2 = 1,03$ кВ/м. 10. $E = 576$ В/м.
11. $\Phi_E = 3,46$ кВ·м. 12. $\Phi_E = 339$ В·м. 13. 1) $E_1 = 169$ В/м;
2) $E_2 = 56,5$ В/м. 14. 1) $E_1 = 0$; 2) $E_{\text{пов}} = 800$ В/м; 3) $E_2 = 450$ В/м.
15. 1) $E_1 = 0$; 2) $E_2 = 5$ кВ/м; 3) $E_3 = 0,9$ кВ/м.

Раздел 14

1. $A = 180$ мкДж. 2. $E = 664$ кВ/м; $\varphi = 26,4$ кВ. 3. $v = 2,53 \cdot 10^6$ м/с.
4. $\tau = 4,33$ мкКл/м. 5. $A = 9,04 \cdot 10^{-19}$ Дж. 6. $W = 48,8$ мкДж.
7. 1) $\varphi_1 = 1,8$ кВ; 2) $\varphi_2 = 1,29$ кВ. 8. $\varphi_1 - \varphi_2 = 16,9$ В. 9. $\varphi_1 - \varphi_2 = 0,94$ В.
10. $\varphi_1 - \varphi_2 = 0,64$ В. 11. $\tau = 3,03$ мКл/м. 12. $U = 22,8$ В. 13. $U = 79,6$ В.
14. $|\text{grad}\varphi| = 282$ В/м (направлен к плоскости).

Раздел 15

1. $d = 9,75$ мм. 2. $U_2 = 250$ В; $C_1 = 118$ пФ; $C_2 = 236$ пФ. 3. $U_2 = 500$ В;
 $C_1 = 118$ пФ; $C_2 = 236$ пФ. 4. $C = 3,43$ нФ. 5. $E = 91$ кВ/м.
6. 1) $C = 135$ пФ; 2) $R = 0,55$ м. 7. В 9 раз, параллельное. 8. $U_1 = 75$ В.
9. $q_1 = q_2 = 18$ мКл; $U_1 = 6$ В; $U_2 = 3$ В. 10. $C_2 = 200$ пФ; $U_1 = 100$ В;
 $U_2 = 100$ В. 11. $W = 0,164$ пДж. 12. $W = 2,46$ пДж. 13. 1) $U_2 = 1,5$ кВ,
2) $A = 2,5$ мкДж. 14. 1) $W_1 = 14,8$ мкДж, $W_2 = 148$ мкДж;
2) $W_1 = 14,8$ мкДж, $W_2 = 14,8$ мкДж. 15. $F = 7,08$ мН.

Раздел 16

1. $E = 576$ В/м. 2. $E = 6,75$ кВ/м. 3. $E = 22$ кВ/м; $\varphi = 386$ В. 4. 2.
5. $\sigma = 15,9$ мКл/м². 6. 1) $E = 100$ В/м; 2) $D = 6,19$ нКл/м²;
3) $P = 5,31$ нКл/м²; 4) $\sigma' = 5,31$ нКл/м². 7. $\Delta\varphi = 1$ кВ. 8. 1) $\chi = 6$;
2) $\sigma' = 759$ нКл/м². 9. $\sigma' = 15,9$ мКл/м². 10. 1) $E_1 = 182$ кВ/м,

$E_2 = 637 \text{ кВ/м}$; 2) $D = 11,3 \text{ мкКл/м}^2$. **11.** $\sigma' = 253 \text{ нКл/м}^2$.
12. 1) $\sigma = 4,24 \text{ мкКл/м}^2$; 2) $\sigma' = 1,12 \text{ мкКл/м}^2$. **13.** $E = 200 \text{ кВ/м}$;
 $\sigma = 12,4 \text{ мкКл/м}^2$; $\sigma' = 10,4 \text{ мкКл/м}^2$. **14.** $\sigma' = 4,27 \text{ мкКл/м}^2$.
15. 1) $\sigma' = 5,31 \text{ нКл/м}^2$; 2) $W = 9,29 \text{ пДж}$.

Раздел 17

1. $\langle v \rangle = 7,4 \text{ мкм/с}$. **2.** $F = 4,16 \cdot 10^{-21} \text{ Н}$. **3.** $\tau = 5 \text{ с}$. **4.** $w = 170 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{с)}$.
5. $\varepsilon = 5,5 \text{ В}$; $r = 0,75 \text{ Ом}$. **6.** $Q = 5 \text{ Кл}$. **7.** $j = 1 \text{ А/мм}^2$. **8.** $I = 2 \text{ А}$.
9. $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $U = 220 \text{ В}$. **10.** $I_2 = 0,75 \text{ А}$; $I_3 = 0,25 \text{ А}$. **11.** $5,76$.
12. $I_{\text{кз}} = 1,2 \text{ А}$. **13.** 1) $E_1 = 45,8 \text{ В/м}$; 2) $E_2 = 1,7 \text{ В/м}$. **14.** $l = 6,99 \text{ м}$.
15. $I_1 = 1,19 \text{ А}$; $I_2 = 0,09 \text{ А}$; $I_3 = 1,27 \text{ А}$. **16.** $I_1 = 3,35 \text{ А}$; $I_2 = 2,83 \text{ А}$;
 $I_3 = 0,55 \text{ А}$.

Раздел 18

1. $\langle v \rangle = 0,1 \text{ мм/с}$. **2.** $E = 0,05 \text{ В/м}$. **3.** $N = 1,27 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$. **4.** $U = 456 \text{ В}$.
5. $R = 3,4 \cdot 10^{14} \text{ Ом}$. **6.** $T = 8036 \text{ К}$. **7.** $v = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. **8.** $h = 54 \text{ мкм}$.
9. $Z = 2$. **10.** $\gamma = 0,5 \text{ нСм}$. **11.** $\Delta n = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. **12.** $v = 1,15 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.
13. $j = 0,24 \text{ мкА/м}^2$; $0,01 \%$. **14.** $I_{\text{н}} = 0,1 \text{ мкА}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Механика

Тема 1. Элементы кинематики и динамики поступательного движения.

Предмет физики. Физика и математика. Общая структура курса и его задачи. Физические модели. Пространство и время. Кинематическое описание движения. Прямолинейное движение точки и движение точки по окружности. Скорость и ускорение. Кинематическое описание движения жидкости. Движение абсолютно твердого тела. Масса и импульс. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Второй закон Ньютона как уравнение движения. Третий закон Ньютона. Силы в природе. Проблема управления движением. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции.

Тема 2. Работа, законы сохранения импульса и энергии, физические поля.

Внешние и внутренние силы. Главный вектор внешних сил. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы. Его связь с однородностью пространства. Реактивное движение. Центр масс механической системы и теорема о его движении. Система центра масс. Работа силы. Кинетическая энергия. Мощность. Кинетическая энергия механической системы и ее связь с работой внешних и внутренних сил. Приложения криволинейного интеграла в механике. Поле как форма материи. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике и его связь с однородностью времени. Общефизический закон сохранения энергии. Удар абсолютно упругих и неупругих тел. Движение в гравитационном поле. Законы Кеплера.

Тема 3. Элементы кинематики и динамики вращательного движения твердого тела.

Кинематика вращательного движения твердого тела. Момент силы и момент импульса. Уравнение моментов. Закон сохранения момента импульса и его связь с изотропностью пространства. Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела. Моменты инерции некоторых тел правильной формы. Теорема Штейнера. Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа и мощность при вращении твердого тела.

Тема 4. Элементы релятивистской механики.

Механический принцип относительности. Преобразования Галилея. Постулаты специальной теории относительности. Интервал и его инвариантность. Виды интервалов. Собственное время. Абсолютное прошлое и абсолютное будущее. Преобразования Лоренца и их следствия. Одновремен-

ность событий. Релятивистский импульс. Уравнения движения релятивистской частицы. Энергия в специальной теории относительности. Понятие об общей теории относительности.

Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика

Тема 5. Основы молекулярной физики, статистические распределения.

Статистический и термодинамический методы. Термодинамическая система и термодинамические параметры. Экстенсивные и интенсивные параметры. Тепловое движение. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Уравнение состояния идеального газа. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Абсолютная температура. Вероятность и флуктуации. Распределение Максвелла. Средняя кинетическая энергия частицы. Средние скорости и наиболее вероятная скорость теплового движения частиц. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.

Тема 6. Основы термодинамики.

Способы передачи энергии термодинамической системе. Теплота и работа. Первое начало термодинамики. Изопрцессы. Степени свободы молекул. Теорема Больцмана. Внутренняя энергия. Функции состояния и функции процесса. Теплоемкость многоатомных газов. Теплоемкость твердых тел. Недостатки классической теории теплоемкости. Обратимые и необратимые тепловые процессы. Квазиравновесные процессы. Круговые процессы. Тепловые машины и холодильники. Цикл Карно. Теорема Карно. Тепловой насос. Энтропия и ее связь с термодинамической вероятностью. Статистический смысл второго начала термодинамики.

Тема 7. Явления переноса, реальные газы и особенности жидкого и твердого состояний вещества.

Понятие о физической кинетике. Время релаксации. Эффективный диаметр молекул, число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул. Диффузия, внутреннее трение, теплопроводность. Теплопроводность твердых тел. Тепловое равновесие элементов радиоаппаратуры. Свойства разреженных газов. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Теоретические и опытные изотермы реального газа. Критическое состояние. Фазы и фазовые превращения. Фазовые диаграммы. Особенности жидкого и твердого состояний вещества. Поверхностное натяжение в жидкостях. Угол смачивания. Капиллярные явления. Давление под искривленной поверхностью. Кристаллические и аморфные тела. Тепловое расширение твердых тел.

Раздел 3. Электричество и магнетизм

Тема 8. Электростатическое поле в вакууме.

Предмет классической электродинамики. Близкодействие. Дискретность заряда и закон его сохранения. Закон Кулона. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь. Электростатическая теорема Гаусса и ее применение для расчета полей. Потенциал электростатического поля. Работа электростатического поля. Потенциал поля и его связь с напряженностью. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля. Эквипотенциальные поверхности и их свойства.

Тема 9. Электрическое поле в веществе, проводники в электростатическом поле.

Диполь во внешнем поле. Поляризационные заряды. Типы диэлектриков и типы поляризации. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость. Электрическое смещение. Теорема Гаусса для электростатического поля в веществе. Сегнетоэлектрики. Диэлектрические домены. Диэлектрический гистерезис. Точки Кюри. Условия для характеристик электростатического поля на границе раздела диэлектрических сред. Электреты и их применение в электрических приборах. Проводники в электростатическом поле. Поле внутри проводника и у его поверхности. Электростатическая защита. Емкость. Конденсаторы. Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия системы заряженных проводников. Энергия и ее объемная плотность для электростатического поля. Закон сохранения энергии в электростатике. Конденсаторы как источники аварийного питания.

Тема 10. Постоянный электрический ток.

Виды электрического тока. Характеристики и условия существования электрического тока. Сторонние силы и ЭДС. Источники электрической энергии. Внутреннее сопротивление. Законы электрического тока. Разветвленные электрические цепи. Обоснование первого и второго правил Кирхгофа. Работа и мощность электрического тока. Законы Ома и Джоуля – Ленца. Закон сохранения энергии для замкнутой электрической цепи. Законы в интегральной и дифференциальной формах. Рекуперативное торможение.

Тема 11. Элементы физической электроники.

Классическая электронная теория электропроводности металлов. Закон Видемана – Франца. Недостатки классической теории и их причины. Электрический ток в газе. Типы газового разряда. Свойства плазмы. Электрический ток в вакууме. Электрический ток в электролитах. Термоэлектронная эмиссия.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)
СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

1 Некоторые физические постоянные (округленные значения)

Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная.....	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро.....	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная.....	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Скорость света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона.....	$m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

2 Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение	Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$	Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$	Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$	Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

3 Упругие постоянные твердых тел

Вещество	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа
Алюминий	69	24
Железо (сталь)	200	76
Медь	98	44

4 Плотность ρ твёрдых тел и жидкостей

Вещество	ρ , 10^3 кг/м^3	Вещество	ρ , 10^3 кг/м^3
Алюминий	2,70	Вода (при 4 °С)	1
Железо	7,88	Глицерин	1,26
Медь	8,93	Масло трансформаторное	0,9
Свинец	11,3	Керосин	0,8

5 Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d , нм	Динамическая вязкость η , мПа·с	Теплопроводность λ , мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	0,27	17,2	24,1
Гелий	0,22	18,9	142
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	0,30	8,32	15,8

6 Динамическая вязкость η и поверхностное натяжение α жидкостей при 20 °С

Вещество	η , мПа·с	α , мН/м	Вещество	η , мПа·с	α , мН/м
Бензол	0,6	29	Мыльная вода	–	40
Вода	1,00	73	Ртуть	1,58	500
Глицерин	1480	62	Спирт	1,19	22

7 Удельное сопротивление ρ_0 (при 20 °С) и температурный коэффициент α проводников

Вещество	ρ_0 , 10^{-8} Ом·м	α , 10^{-4} °С ⁻¹
Алюминий	3,21	38
Медь	1,7	42,8
Железо	12	62
Вольфрам	5,5	51
Свинец	20,8	43
Нихром	100	4

8 Диэлектрическая проницаемость ϵ некоторых веществ

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Вода	81,0	Резина, каучук	2,5
Глицерин	3,9	Слюда	7,5
Керосин	2,0	Стекло	7,0
Масло (трансформаторное)	2,2	Фарфор	5,0
Парафин	2,0	Эбонит	2,7

9 Подвижность ионов газов (при нормальных условиях)

Газ	Подвижность, $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$		Газ	Подвижность, $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	
	u_+	u_-		u_+	u_-
Водород	1,3	1,8	Кислород	1,3	1,8
Воздух	5,4	7,4	Углекислый газ	1,0	1,1
Азот	1,4	1,9	Хлор	0,6	0,5

10 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Элементы кинематики поступательного движения.....	4
2 Элементы динамики поступательного движения.....	8
3 Закон сохранения импульса. Реактивное движение.....	13
4 Работа. Энергия. Мощность. Закон сохранения энергии.....	17
5 Элементы кинематики вращательного движения твердого тела.....	21
6 Элементы динамики вращательного движения твердого тела. Моменты инерции тел.....	24
7 Элементы релятивистской механики.....	30
8 Основы молекулярной физики. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа.....	34
9 Элементы статистической физики.....	40
10 Первое начало термодинамики и его применение к изопроцессам.....	43
11 Второе начало термодинамики. Тепловые двигатели и их КПД для идеального газа.....	48
12 Явления переноса. Реальные газы и особенности жидкого и твердого состояний вещества.....	51
13 Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля.....	57
14 Потенциал и работа электростатического поля.....	63
15 Проводники в электростатическом поле. Конденсаторы. Энергия электростатического поля.....	67
16 Электростатическое поле в диэлектриках.....	71
17 Постоянный электрический ток. Сторонние силы. ЭДС. Работа и мощность постоянного тока.....	75
18 Электрический ток в металлах, вакууме и газах.....	80
Список рекомендуемой литературы.....	86
Ответы к задачам.....	87
Приложение А. Содержание учебной дисциплины.....	91
Приложение Б. Справочные таблицы.....	94

Учебное издание

ДОЦЕНКО Елена Иосифовна
ДЕЛИКАТНАЯ Ирина Олеговна
ШИЛЯЕВА Ксения Павловна

**МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Пособие

Редактор Я. В. Войтеховская
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 01.07.2022 г. Формат 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 4,80. Тираж 150 экз.
Зак. № 1526. Изд. № 15.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель