

Оглавление

Введение.....	4
Механика.....	5
Основные формулы.....	5
Кинематика материальной точки.....	5
Динамика материальной точки.....	6
Силы в механике.....	6
Энергия. Работа. Законы сохранения.....	7
Динамика вращательного движения твёрдого тела.....	7
Специальная теория относительности (СТО).....	8
Механика жидкостей и газов.....	9
Механические колебания и волны.....	9
Примеры решения задач.....	11
Занятие 1. Кинематика материальной точки.....	17
Занятие 2. Динамика материальной точки и твёрдого тела. Закон сохранения импульса.....	18
Занятие 3. Динамика твёрдого тела.....	18
Занятие 4. Законы сохранения энергии и момента импульса. Элементы специальной теории относительности.....	19
Занятие 5. Элементы механики сплошных сред. Упругие напряжения. Энергия упруго деформированного тела.....	20
Занятие 6. Гармонические колебания. Волновые процессы.....	21
Молекулярная физика и термодинамика.....	22
Основные формулы.....	22
Молекулярная физика.....	22
Термодинамика.....	23
Примеры решения задач.....	27
Занятие 7. Газовые законы.....	31
Занятие 8. Статистические распределения.....	32
Занятие 9. Основы термодинамики.....	32
Занятие 10. Основы термодинамики (продолжение).....	33
Занятие 11. Явления переноса. Реальные газы.....	34
Электростатика.....	34
Основные формулы.....	34
Электростатическое поле в вакууме.....	34
Теорема Остроградского-Гаусса и её применение.....	35
Потенциал и работа электростатического поля. Связь напряжённости с потенциалом.....	35
Диэлектрики в электростатическом поле.....	36
Проводники в электростатическом поле.....	36
Примеры решения задач.....	37
Занятие 12. Постоянное электрическое поле в вакууме.....	38
Занятие 13. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле. Электроёмкость. Энергия электрического поля.....	39
Занятие 14. Диэлектрики в электростатическом поле.....	40
Постоянный электрический ток.....	41
Основные формулы.....	41
Примеры решения задач.....	43
Занятие 15. Постоянный электрический ток.....	45
Рекомендуемая литература.....	47

Введение

Данные методические указания предназначены для использования студентами технологических специальностей бакалавриата на практических (семинарских) занятиях и на СРСП.

Решение задач по физике — необходимый элемент учебной работы. Задачи дают материал для упражнений, требующих применения физических закономерностей к явлениям, протекающим в тех или иных конкретных условиях. Без такой конкретизации знания остаются книжными, не имеющими практической ценности.

Решение задач способствует более глубокому и прочному усвоению физических законов, развитию логического мышления, сообразительности, инициативы, воли и настойчивости в достижении поставленной цели, вызывает интерес к физике, помогает на выработку навыков самостоятельной работы и служит незаменимым средством для развития самостоятельности суждения, что является одним из методов познания взаимосвязи законов природы.

В стандартах высшего профессионального образования на самостоятельную работу с преподавателем и самостоятельную внеаудиторную работу по физике для данной специальности отводится $3+3=6$ часов в неделю. Кроме того, большая часть времени, отводимого на аудиторские занятия, так же предполагает самостоятельную работу. Аудиторная самостоятельная работа может реализовываться при проведении практических занятий, семинаров, выполнении лабораторного практикума и во время чтения лекций.

При проведении семинаров и практических занятий студенты могут выполнять СРС как индивидуально, так и малыми группами (творческими бригадами), каждая из которых разрабатывает свой проект (задачу). Выполненный проект (решение проблемной задачи) затем рецензируется другой бригадой по круговой системе. Публичное обсуждение и защита своего варианта повышают роль СРС и усиливают стремление к ее качественному выполнению. Данная система организации практических занятий позволяет вводить в задачи научно-исследовательские элементы, упрощать или усложнять задания.

Механика

Основные формулы

Кинематика материальной точки

- ◆ Уравнение движения материальной точки $\vec{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$.
- ◆ Вектор перемещения $\Delta\vec{r} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k}$.
- ◆ Модуль вектора перемещения $|\Delta\vec{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$.
- ◆ Средняя скорость $\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$.
- ◆ Мгновенная скорость $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k}$.
- ◆ Модуль скорости $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$.
- ◆ Среднее ускорение $\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$.
- ◆ Мгновенное ускорение $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$.
- ◆ Модуль ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.
- ◆ Полное ускорение при криволинейном движении $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$.
- ◆ Тангенциальная составляющая ускорения $a_\tau = \frac{dv}{dt}$.
- ◆ Нормальная составляющая ускорения $a_n = \frac{v^2}{r}$.
- ◆ Кинетическое уравнение равномерного движения материальной точки вдоль оси x :
$$x = x_0 + vt.$$
- ◆ Уравнения равнопеременного поступательного движения
$$x = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; \quad v = v_0 \pm at.$$
- ◆ Кинетическое уравнение равномерного вращения $\varphi = \varphi_0 + \omega t$.
- ◆ Угловая скорость $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$.
- ◆ Угловое ускорение $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$.
- ◆ Период вращения $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

- ♦ Частота вращения $\nu = \frac{1}{T}$.
- ♦ Циклическая частота вращения $\omega = 2\pi\nu$.
- ♦ Уравнения равнопеременного вращательного движения

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \quad \varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

- ♦ Связь между линейными и угловыми величинами при вращательном движении $S = R\varphi, \quad v = R\omega, \quad a_\tau = R\varepsilon, \quad a_n = R\omega^2$.

Динамика материальной точки

- ♦ Импульс (количество движения) $\vec{p} = m\vec{v}$.
- ♦ Закон сохранения импульса (для замкнутой системы) $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const}$.
- ♦ Второй закон Ньютона $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$.
- ♦ Третий закон Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.
- ♦ Центр масс системы материальных точек $\vec{r}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n r_i m_i$.
- ♦ Импульс системы тел $\vec{p} = m\vec{v}_c$.
- ♦ Теорема о движении центра масс $\vec{a}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n F_{i \text{ внеш }}$.

Силы в механике

- ♦ Закон всемирного тяготения $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ или $\vec{F} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$.
- ♦ Связь веса тела с силой тяжести и реакцией опоры $\vec{G} = m\vec{g} = -\vec{N}$.
- ♦ Соотношение между весом, силой тяжести и ускорением $G = m(g \pm a)$.
- ♦ Сила трения скольжения $F_{тр} = \mu N$.
- ♦ Центробежная сила $F_{цб} = ma_n = m\omega^2 R$.
- ♦ Закон Гука для пружины $F_{упр} = -kx$.
- ♦ Связь между силой и потенциальной энергией $\vec{F} = -\frac{dU}{d\vec{r}}$.
- ♦ Потенциальная энергия упругой пружины $U = \frac{kx^2}{2}$.
- ♦ Работа, совершённая пружиной $A = -\frac{kx^2}{2}$.

- ◆ Напряжение $\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$.
- ◆ Приращение длины $\Delta l = \frac{l_0 \sigma}{E}$.
- ◆ Относительное продольное растяжение (сжатие) $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\sigma}{E}$.
- ◆ Закон Гука для стержня $\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma$.
- ◆ Модуль Юнга $E = \frac{Fl_0}{S\Delta l}$.

Энергия. Работа. Законы сохранения

- ◆ Кинетическая энергия $K = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$.
- ◆ Изменение кинетической энергии $\Delta K = A$.
- ◆ Работа переменной силы на участке траектории 1–2 $A = \int_1^2 F \cos \alpha dS$.
- ◆ Мгновенная мощность $N = \frac{dA}{dt} = Fv$.
- ◆ Работа консервативных сил $A = U_1 - U_2$.
- ◆ Потенциальная энергия тела при гравитационном взаимодействии $U = mgh$.
- ◆ Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия между массами m и M $U = -\gamma \frac{Mm}{r}$.
- ◆ Первая космическая скорость $v_1 = \sqrt{gR}$.
- ◆ Вторая космическая скорость $v_2 = \sqrt{2gR}$.
- ◆ Полная механическая энергия системы $E = K + U$.
- ◆ Закон сохранения полной механической энергии (для замкнутой системы) $K + U_{\text{внутр}} = E = \text{const}$.
- ◆ Закон сохранения импульса при движении ракеты $m_p v_p = m_r v_r$.

Динамика вращательного движения твёрдого тела

- ◆ Момент силы $\vec{M}_i = [\vec{r}_i, \vec{F}_i]$ или $M = Fr \sin \alpha = Fl$.
- ◆ Момент импульса относительно точки $\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = [\vec{r}, m\vec{v}]$.

- ◆ Основной закон динамики вращательного движения относительно точки $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}^{\text{внеш}}$.
- ◆ Момент импульса относительно неподвижной оси $L_z = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i = J_z \omega$.
- ◆ Уравнение динамики вращательного движения твёрдого тела $M = J\varepsilon$.
- ◆ Закон сохранения момента импульса $\vec{L} = \text{const}$ или $J\vec{\omega} = \text{const}$.
- ◆ Момент инерции системы (тела) $J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$ или $J = \int_0^m R^2 dm$.
- ◆ Момент инерции полого и сплошного цилиндров (или диска) относительно оси симметрии $J_c = mR^2$, $J_c = \frac{1}{2} mR^2$.
- ◆ Момент инерции шара и сферы $J_c = \frac{2}{5} mR^2$, $J_c = \frac{2}{3} mR^2$.
- ◆ Момент инерции тонкого стержня относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину $J_c = \frac{1}{12} ml^2$.
- ◆ Теорема Штейнера $J = J_c + md^2$.
- ◆ Кинетическая энергия вращающегося тела $K_{\text{вр}} = \frac{J\omega^2}{2}$.
- ◆ Полная кинетическая энергия катящегося тела $K = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$.

Специальная теория относительности (СТО)

- ◆ Преобразования Галилея $x = x' + vt$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$ или $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t$.
- ◆ Закон сложения скоростей в классической механике $u = v' + v$.
Здесь v' — скорость тела в движущейся системе отсчёта, v — скорость движения самой системы отсчёта.
- ◆ Релятивистское (Лоренцево) сокращение длины стержня $l = l_0 \sqrt{1 - v/c^2}$
- ◆ Релятивистское замедление хода часов $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$
- ◆ Релятивистский закон сложения скоростей $u = \frac{v' + v}{1 + \frac{v'v}{c^2}}$.
- ◆ Масса релятивистской частицы $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$.

- ♦ Релятивистское выражение для импульса $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$
- ♦ Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы $E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}.$
- ♦ Релятивистское выражение для энергии $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$
- ♦ Кинетическая энергия релятивистской частицы $K = E - E_0 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$
- ♦ Закон взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$
- ♦ Энергия покоя $E_0 = m_0 c^2.$

Механика жидкостей и газов

- ♦ Давление $P = \frac{F}{S}.$
- ♦ Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости $Sv = \text{const}.$
- ♦ Уравнение Бернулли $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + P = \text{const}.$
- ♦ Архимедова сила $F_A = \rho g V.$
- ♦ Формула Торричелли $v = \sqrt{2gh}.$
- ♦ Формула Стокса $F = 6\pi\eta rv.$
- ♦ Поверхностное натяжение $\sigma = \frac{F}{lb}$ или $\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S}.$

Механические колебания и волны

- ♦ Уравнение гармонических (свободных незатухающих) колебаний и его решение: $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad x(t) = a \cos(\omega_0 t + \alpha),$
где ω_0 — собственная частота колебаний, a — амплитуда колебаний.
- ♦ Для математического маятника собственная частота $\omega_0 = \sqrt{g/l},$
где g — ускорение свободного падения, l — длина маятника.
- ♦ Для груза массой m , совершающего колебания на пружине с коэффициентом жёсткости k , собственная частота $\omega_0 = \sqrt{k/m}.$

- ◆ Уравнение *затухающих* колебаний и его решение: $\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$,
 $x(t) = a_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)$, где β — коэффициент затухания,
 ω — частота затухающих колебаний: $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.
- ◆ Логарифмическим декрементом затухания называют логарифм отношения амплитуды любого k -го колебания к амплитуде $(k+1)$ -го колебания:
 $\delta = \ln \frac{a_k}{a_{k+1}} = \beta T$, где $T = 2\pi/\omega$ — период колебаний,
 $a_k = a_0 e^{-\beta t}$ — амплитуда k -го колебания,
 $a_{k+1} = a_0 e^{-\beta(t+T)}$ — амплитуда $(k+1)$ -го колебания.
- ◆ Если на колебательную систему действует внешняя периодическая *вынуждающая* сила $f(t) = f_0 \cos \omega t$, в системе с течением времени устанавливаются *вынужденные* колебания, частота которых равна частоте вынуждающей силы.
- ◆ Уравнение вынужденных колебаний и его установившееся решение:
 $\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f_0}{m} \cos \omega t$, $x(t) = a \cos(\omega_0 t + \varphi)$,
где $a = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}$, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}$.
- ◆ Резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний при некоторой частоте вынуждающей силы $\omega_{\text{рез}}$ называется *резонансом*.
- ◆ Максимум амплитуды наступает при $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$. Если сила сопротивления невелика, то $\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0$.
- ◆ Скорость распространения волны: $v = \frac{\lambda}{T}$, где λ — *длина волны* — расстояние, на которое распространяются колебания за время, равное T — периоду колебаний частиц среды.
- ◆ В изотропной твердой среде скорость поперечных волн $v_G = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$,
где G — модуль сдвига, ρ — плотность среды.
- ◆ Уравнение синусоидальной волны, распространяющейся вдоль координатной оси Ox :

$$s = a \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right] = a \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right].$$
Здесь s — смещение из положения равновесия колеблющейся точки с координатой x в момент времени t , a — амплитуда волны, φ_0 — начальная фаза колебаний точки с координатой $x = 0$.

- ♦ Для плоской волны амплитуда постоянна в любой точке среды, для сферической — убывает по мере удаления от источника колебаний как $1/r$, где r — расстояние от источника.

Примеры решения задач

1. С башни брошен камень в горизонтальном направлении с начальной скоростью 40 м/с. Какова скорость камня после начала движения? Какой угол вектор скорости камня с плоскостью горизонта в этот момент?

Дано: $v_0 = 40$ м/с, $g = 9.81$ м/с²

Найти: v — ?, α — ?

Решение:

На брошенный горизонтально камень действует только сила тяжести (силой сопротивления воздуха пренебрегаем). Значит, рассматриваемый камень движется в ускорением свободного падения g , направленном вертикально вниз.

Таким образом, движение камня можно рассматривать как комбинацию двух движений (см. Рисунок 1):

Равномерного движения в горизонтальном направлении имеем со скоростью $\vec{g}_x = \vec{g}_0$;

Свободного падения в вертикальном направлении со скоростью, изменяющейся по закону:

$$\vec{g}_y = \vec{g}t$$

Мгновенная скорость и её модуль в каждой точке траектории:

$$\vec{g} = \vec{g}_x + \vec{g}_y = \vec{g}_0 + \vec{g}t$$

$$g = \sqrt{g_0^2 + (gt)^2}.$$

Определим значение скорости в конце первой секунды после начала движения ($t = 1$ с):

$$g = \sqrt{40^2 + (9.81 \cdot 1)^2} = 41,2 \text{ м/с}.$$

В соответствии с рисунком определим какой угол вектор скорости камня с плоскостью горизонта в этот момент:

$$\alpha = \arctg \frac{g_y}{g_x} = \arctg \frac{9.81 \cdot 1}{40} = \arctg(0.2452)$$

$$\alpha = 14^\circ 12'.$$

Ответ: $v = 41,2$ м/с, $\alpha = 14,2^\circ$.

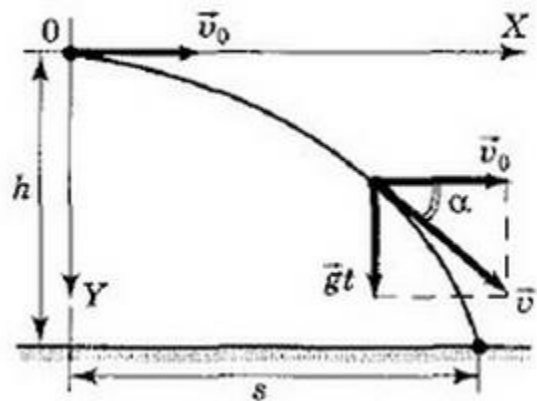


Рисунок 1

2. Скорость частицы массой m , движущейся в плоскости xOy , изменяется по закону $\vec{g} = At\vec{i} + Bt^2\vec{j}$, где A и B - постоянные. Найдите модуль результирующей силы, действующей на частицу, в зависимости от времени.

Дано: m , $\vec{g} = At\vec{i} + Bt^2\vec{j}$.

Найти: F .

Решение:

Согласно 2-го закона Ньютона, результирующую силу F можно определить из соотношения $F = ma$, где мгновенное значение ускорения определим как первую производную от скорости:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{g}}{dt} = A\vec{i} + 2Bt\vec{j}$$

$$|\vec{a}| = \sqrt{A^2 + 4(Bt)^2}, \text{ м/с}^2$$

Тогда зависимость модуля результирующей силы определяется формулой:

$$|\vec{F}| = m\sqrt{A^2 + 4(Bt)^2}, \text{ Н}.$$

Ответ: $|\vec{F}| = m\sqrt{A^2 + 4(Bt)^2}, \text{ Н}.$

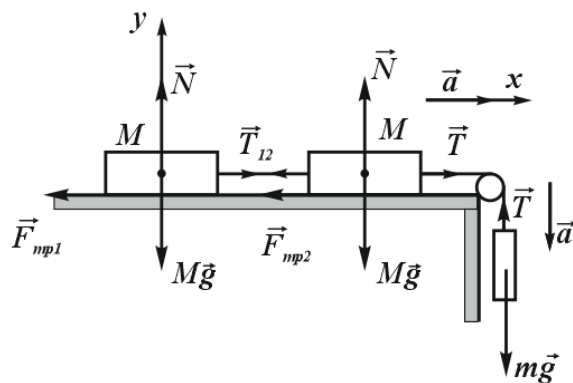
3. На горизонтальном столе лежат два тела массы 1 кг каждое. Тела связаны невесомой нерастяжимой нитью. Такая же нить связывает тело 2 с грузом $m = 0,5$ кг. Нить может скользить без трения по горизонтальному желобу, укрепленному на краю стола. Коэффициент трения первого тела со столом $\mu_1 = 0,1$, второго $\mu_2 = 0,15$. Найдите: а) ускорения, с которыми движутся тела; натяжение T_{12} нити, связывающей тела 1 и 2; в) натяжение нити T , на которой висит груз.

Дано: $M = 1$ кг; $m = 0,5$ кг.

Найти: a — ?, T_{12} — ?, T — ?.

Решение:

Составим уравнения движения тел в соответствии с рисунком:



$$\begin{cases} \vec{T}_{12} + \vec{F}_{mp1} + \vec{N} + M\vec{g} = M\vec{a} \\ \vec{T}_{12} + \vec{F}_{mp2} + \vec{T} + \vec{N} + M\vec{g} = M\vec{a} \\ \vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a} \end{cases} \quad (1)$$

Спроецируем сила по осям x :

$$\begin{cases} T_{12} - F_{mp1} = Ma \\ -T_{12} - \vec{F}_{mp2} + T = Ma \end{cases} \quad (2)$$

и y :

$$\begin{cases} T - mg = -ma \\ N - Mg = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T = m(g - a) \\ N = Mg \end{cases} \quad (3)$$

Принимая во внимание, что $F_{mp} = \mu N = \mu Mg$, преобразуем (2) к виду:

$$\begin{cases} T_{12} - \mu_1 Mg = Ma \\ -T_{12} - \mu_2 Mg + T = Ma \end{cases}$$

Сложим уравнения:

$$-\mu_2 Mg - \mu_1 Mg + T = 2Ma$$

$$-\mu_2 Mg - \mu_1 Mg + mg - ma = 2Ma$$

$$g(-\mu_2 M - \mu_1 M + m) = a(2M + m)$$

$$a = \frac{g(m - (\mu_1 + \mu_2) \cdot M)}{(2M + m)} = \frac{9,81(0,5 - (0,1 + 0,15) \cdot 1)}{(2 \cdot 1 + 0,5)} = 0,98 \text{ м/с}^2$$

Определим из (2) натяжение нити T_{12} :

$$\begin{aligned} T_{12} &= \mu_1 Mg + Ma = \mu_1 Mg + M \frac{g(m - (\mu_1 + \mu_2) \cdot M)}{(2M + m)} = \\ &= \frac{Mg[m(1 + \mu_1) - M(\mu_2 - \mu_1)]}{2M + m} = \frac{1 \cdot 9,81[0,5(1 + 0,1 - 1 \cdot (0,15 - 0,1))]}{2 \cdot 1 + 0,5} = 2 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Определим натяжение нити T :

$$T = m(g - a) = 0,5 \cdot (9,81 - 0,98) = 4,4 \text{ Н}$$

Ответ: $a = 0,98 \text{ м/с}^2$; $T_{12} = 2 \text{ Н}$; $T = 4,4 \text{ Н}$.

4. Какова мощность воздушного потока сечением $s = 0,55 \text{ м}^2$ при скорости воздуха $v = 20 \text{ м/с}$ и нормальных условиях?

Дано: $s = 0,55 \text{ м}^2$; $v = 20 \text{ м/с}$; $p = 10^5 \text{ Па}$; $T = 273 \text{ К}$.

Найти: N — ?

Решение:

Мощность определяется как скорость совершения работы A со временем t :

$$N = \frac{A}{t}. \quad (1)$$

В данном случае работа совершается за счет запаса кинетической энергии частиц воздуха:

$$A = \Delta T = \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Массу воздуха можно как произведение плотности ρ на объём V :

$$m = \rho V = \rho \vartheta \cdot t \cdot s. \quad (3)$$

Подставляя выражения (3) и (2) в (1) получим:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{m \vartheta^2}{2t} = \frac{\rho v t s v^2}{2t} = \frac{1}{2} \rho v^3 s. \quad (4)$$

Плотность воздуха определим из основного уравнения МКТ:

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT = \frac{m}{Vm_0} kT = \frac{\rho \cdot N_A kT}{\mu} = \frac{\rho RT}{\mu} \quad (5)$$

Здесь:

p — давление воздуха;

k — постоянная Больцмана;

n — концентрация молекул воздуха;

N — число молекул в объёме V ;

m_0 — масса одной молекулы;

N_A — число Авогадро;

$\mu = 29 \text{ г/моль}$ — молярная масса воздуха;

$R = 8,31 \text{ Дж/ (моль} \cdot \text{К)}$ — универсальная газовая постоянная.

Получаем из (5) выражение для плотности воздуха:

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT = \frac{m}{Vm_0} kT = \frac{\rho \cdot N_A kT}{\mu} = \frac{\rho RT}{\mu}$$
$$\rho = \frac{p\mu}{RT}$$

Окончательно получаем выражение для мощности, подставив (5) в (4):

$$N = \frac{1}{2} \rho s v^3 = \frac{ps\mu v^3}{2RT}.$$

Проверим размерность:

$$\begin{aligned} [N] &= \frac{[p][s][\mu][v]^3}{2[R][T]c} = \frac{H \cdot m^2 \cdot кг \cdot m^3 \cdot моль \cdot K}{m^2 \cdot моль \cdot c^3 \cdot Дж \cdot K} = \\ &= \frac{H \cdot m^3 \cdot кг}{c^3 \cdot Дж} = \frac{Дж^2}{c \cdot Дж} = \frac{Дж}{c} \end{aligned}$$

Подставим численные значения в полученные выражения:

$$N = \frac{1}{2} \frac{10^5 \cdot 0,55 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \cdot 20^3}{8,31 \cdot 273} = 2812 \text{ Вт} \approx 2,8 \text{ кВт}.$$

Ответ: $N = 2,8 \text{ кВт}$

5. На какой высоте h ускорение свободного падения в 2 раза меньше его значения на поверхности Земли? $R_3 = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$.

Дано: $g_1 = 2g_2$; $R_3 = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$.

Найти: h — ?

Решение:

Из закона всемирного тяготения имеем:

$$G \frac{Mm}{r^2} = mg \Rightarrow g = G \frac{M}{R^2}$$

Здесь:

G — гравитационная постоянная;

M и m — соответственно, массы Земли и тела.

Тогда можно записать:

$$g_1 = G \frac{M}{R^2}$$

$$g_2 = G \frac{M}{(R+h)^2}$$

Откуда:

$$\frac{(R+h)^2}{R^2} = 2$$

$$R+h = R\sqrt{2}$$

$$h = R(\sqrt{2}-1) = 0,41R = 0,41 \cdot 6,37 \cdot 10^6 = 2,61 \cdot 10^6 \text{ м}.$$

Ответ: 2610 км.

6. Ион, вылетев из ускорителя, испустил фотон в направлении своего движения. Определите скорость фотона относительно ускорителя, если скорость иона относительно ускорителя равна $v = 0,8 c$, где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Дано: $v = 0,8 c$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Найти: u — ?

Решение:

Воспользуемся релятивистским законом сложения скоростей:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}},$$

где $u' = c$ — скорость фотона относительно иона (подвижной системы отсчёта).

$$u = \frac{c + 0,8c}{1 + \frac{c \cdot 0,8c}{c^2}} = \frac{1,8c}{1,8} = c.$$

Ответ: $u = c$.

7. Материальная точка совершает колебания по закону синуса. Амплитуда точки равна 20 см; наибольшая скорость 40 см/с. Запишите уравнение колебаний и найдите величину максимального ускорения точки. Начальная фаза колебаний $\varphi_0 = 0$.

Дано: $A = 0,2$ м, $v_{\max} = 0,4$ м/с, $\varphi_0 = 0$.

Найти: $x(t)$ — ? $a_{\max}$ — ?

Решение:

Уравнение колебаний имеет вид:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где ω — циклическая частота колебаний.

Определим закон изменения скорости с учётом того, что начальная фаза колебаний равна нулю:

$$v = x'(t) = A\omega \cos \omega t$$

$$v_{\max} = A\omega,$$

откуда циклическая частота:

$$\omega = \frac{v_{\max}}{A} = \frac{0,4}{0,2} = 2 \text{ рад/с}.$$

Тогда уравнение колебаний будет иметь вид:

$$x = 0,2 \sin 2t, \text{ м}.$$

Найдем ускорение как производную от скорости:

$$a = v'(t) = -A\omega^2 \sin \omega t$$

$$a_{\max} = A\omega^2 = 0,2 \cdot 2^2 = 0,8 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $x = 0,2 \sin 2t, \text{ м}$, $a_{\max} = 0,8 \text{ м/с}^2$.

Занятие 1. Кинематика материальной точки

1. Первую половину своего пути автомобиль двигался со скоростью $v_1 = 80$ км/ч, а вторую половину пути — со скоростью $v_2 = 40$ км/ч. Какова средняя скорость v движения автомобиля?
2. Зависимость пройденного телом пути s от времени t даётся уравнением $s = At - Bt^2 + Ct^3$, где $A = 2$ м/с, $B = 3$ м/с² и $C = 4$ м/с³. Найти:
а) зависимость скорости v и ускорения a от времени t ; б) расстояние, пройденное телом, скорость и ускорение тела через время $t = 2$ с после начала движения. Построить график зависимости пути s , скорости v и ускорения a от времени t для интервала $0 \leq t \leq 3$ с через 0,5 с.
3. Точка движется по окружности со скоростью $\varphi = at$, где $a = 0,50$ м/с². Найти её полное ускорение в тот момент, когда она пройдёт $n = 0,1$ длины окружности после начала движения.
4. Камень брошен с вышки высотой 25 м в горизонтальном направлении со скоростью 15 м/с. Какое время t камень будет в движении? На каком расстоянии s от основания башни он упадёт на землю? С какой скоростью он упадёт на землю? Какой угол ϕ составит траектория камня с горизонтом в точке его падения на землю? Определить скорость, тангенциальное и нормальное ускорения камня в конце второй секунды после начала движения.
5. Точка движется по окружности радиусом $R = 10$ см с постоянным тангенциальным ускорением a_τ . Найти нормальное ускорение a_n точки через время $t = 20$ с после начала движения. если известно, что к концу пятого оборота после начала движения линейная скорость точки $v = 10$ см/с.
6. Найти радиус вращающегося колеса, если известно, что линейная скорость v_1 точки, лежащей на ободе, в 2,5 раза больше линейной скорости v_2 , лежащей на 10 см ближе к оси колеса.
7. Колесо вращается с постоянным угловым ускорением $\varepsilon = 2$ с⁻². Через $t = 0,5$ с после начала движения полное ускорение колеса стало равно 13,6 см/с². найти радиус колеса.
8. Колесо радиусом $R = 0.1$ м вращается так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени даётся уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^2$, где $B = 2$ рад/с и $C = 1$ рад/с³. Для точек, лежащих на ободе колеса, найти через время $t = 2$ с после начала движения: а) угловую скорость ω ; б) линейную скорость v ; в) угловое ускорение ε ; г) тангенциальное a_τ и нормальное a_n ускорения.

Занятие 2. Динамика материальной точки и твёрдого тела. Закон сохранения импульса

1. Молекула, подлетевшая к стенке под углом 60° , упруго ударяется о неё со скоростью 400 м/с и отлетает. Определить импульс силы, полученный стенкой. Масса молекулы $3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$.
2. На покоившуюся частицу массы m в момент времени $t = 0$ начала действовать сила, меняющаяся со временем по закону $F = at(\tau - t)$, где a — постоянный вектор, τ — время, в течение которого действует данная сила. Найти импульс частицы после окончания действия силы.
3. Две гири массами 2 и 1 кг соединены нерастяжимой гибкой нитью, перекинутой через неподвижный блок, вращающийся без трения. С каким ускорением будут двигаться грузы? Чему равна сила натяжения нити?
4. Какой продолжительности должны были бы быть сутки на Земле, чтобы тела на экваторе не имели веса?
5. Лента горизонтального транспортёра движется со скоростью $u = 15 \text{ м/с}$. На ленту, касаясь её, влетает шайба с начальной скоростью $v_0 = 2,1 \text{ м/с}$, перпендикулярной краю ленты. Найти ширину ленты, при которой шайба остановится на её краю, если коэффициент трения между шайбой и лентой $k = 0,75$.
6. Снаряд массой 2 кг , летящий со скоростью 300 м/с , попадает в мишень с песком массой 100 кг и застревает в ней. Вычислить, с какой скоростью и в каком направлении будет двигаться мишень после попадания снаряда, если 1) мишень была неподвижна; 2) мишень двигалась навстречу снаряду со скоростью 72 км/ч ; 3) мишень двигалась с той же скоростью по направлению движения снаряда.
7. Брусок массой $0,5 \text{ кг}$ прижат к вертикальной стене силой 10 Н , направленной горизонтально. Коэффициент трения скольжения между бруском и стеной равен $0,4$. Какую минимальную силу надо приложить к бруску по вертикали, чтобы равномерно поднимать его вертикально вверх?
8. Найти численное значение первой и второй космических скоростей для Луны, считая, ускорение свободного падения на Луне в 6 раз меньше, чем на Земле.

Занятие 3. Динамика твёрдого тела

1. Маховик, момент инерции которого $J = 63,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ вращается с угловой скоростью $\omega = 31,4 \text{ рад/с}$. Найти момент сил торможения M , под действием которого маховик останавливается через время $t = 20 \text{ с}$. Маховик считать однородным диском.

2. На барабан массой $M = 9$ кг намотан шнур, к концу которого привязан груз массой 2 кг. Найти ускорение груза. Груз считать сплошным диском.
3. На барабан радиусом $R = 0,5$ м намотан шнур, к концу которого привязан груз $m_1 = 10$ кг. Найти момент инерции барабана, если известно, что груз опускается с ускорением $a = 2,04$ м/с².
4. Две гири с массами $m_1 = 2$ кг и $m_2 = 1$ кг соединены нитью, перекинутой через блок массой $M = 1$ кг. Найти ускорение a , с которым движутся гири, силы натяжения T_1 и T_2 , нитей, к которым подвешены гири. Блок считать однородным диском. Трением пренебречь.
5. Вентилятор вращается со скоростью, соответствующей частоте 900 об/мин. После выключения вентилятор, вращаясь равнозамедленно, сделал до остановки 75 об. Работа сил торможения составляет 44,4 Дж. Найти: 1) момент инерции вентилятора; 2) момент сил торможения.
6. К ободу диска массой $m = 5$ кг приложена постоянная касательная сила $F = 20$ Н. Какую кинетическую энергию будет иметь диск через $\Delta t = 5$ с после начала действия силы?
7. Стержень вращается вокруг оси, проходящей через его середину, согласно уравнению $\varphi = At + Bt^3$, где $A = 2$ рад/с, $B = 0,2$ рад/с³. Определите вращающий момент M , действующий на стержень через $t = 2$ с после начала вращения, если момент инерции стержня $J = 0,043$ кг·м².
8. Обруч и диск имеют одинаковый вес и катятся без скольжения с одинаковой линейной скоростью v . Кинетическая энергия обруча $W_1 = 40$ Дж. Найти кинетическую энергию W_2 диска.

Занятие 4. Законы сохранения энергии и момента импульса.

Элементы специальной теории относительности

1. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы сжать пружину на 20 см, если известно, что сила пропорциональна деформации, и под действием силы в 30 Н пружина сжимается на 1 см.
2. Поезд поднимается в гору с постоянной скоростью 36 км/ч. Уклон горы 1 м на 1000 м пути. Коэффициент трения 0,002. Определить, с какой скоростью будет двигаться поезд по горизонтальному пути при той же мощности двигателя?
3. Стальной шарик массой 20 г, падая с высоты $h = 1$ м на стальную плиту, отскакивает от неё на высоту $h_1 = 81$ см. Найти импульс силы p , полученный плитой за время удара, и количество теплоты Q , выделившееся при ударе.
4. Горизонтальная платформа массой $M = 100$ кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, с частотой $n =$

100 об/мин. Человек массой $m = 60$ кг стоит при этом на краю платформы. С какой частотой n_1 начнет вращаться платформа, если человек перейдет от края платформы к ее центру? Считать платформу однородным диском, а человека — точечной массой.

5. Льдина площадью поперечного сечения $S = 1 \text{ м}^2$ и высотой $H = 0,4 \text{ м}$ плавает в воде. Какую работу нужно совершить, чтобы полностью погрузить льдину в воду?
6. Зависимость потенциальной энергии U тела в центральном силовом поле от расстояния r до центра поля задается функцией $U(r) = (A/r^2) - (B/r)$ ($A = 6 \text{ мкДж} \cdot \text{м}^2$, $B = 0,3 \text{ мДж} \cdot \text{м}$). Определите, при каких значениях r максимальное значение принимают: 1) потенциальная энергия тела; 2) сила, действующая на тело.
7. Цилиндр массой 5 кг катится без скольжения с постоянной скоростью 14 м/с . Определить: 1) кинетическую энергию цилиндра; 2) через сколько времени цилиндр остановится, если сила трения равна 50 Н .
8. Кинетическая энергия T электрона равна 1 МэВ . Определить скорость электрона.

Занятие 5. Элементы механики сплошных сред. Упругие напряжения. Энергия упруго деформированного тела

1. Два бревна скреплённых вместе длиной $3,5 \text{ м}$ и диаметром 22 см каждое плавают в воде. Какова масса человека, который сможет стоять на бревнах, не замочив ног? Плотность дерева $\rho = 0,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
2. Какова примерно скорость катера, если вода поднимается при движении вдоль его носовой вертикальной части на высоту 1 м ?
3. В цилиндрическое ведро диаметра $D = 25 \text{ см}$ налита вода, занимающая объём 12 л . Каково давление p воды на стенку ведра на высоте 10 см от дна?
4. В цилиндрический сосуд с водой опустили железную коробочку, из-за чего уровень воды в сосуде поднялся на высоту $h = 2 \text{ см}$. На сколько изменится (поднимется или опустится) уровень воды, если коробочка утонет? Плотность железа $7,8 \text{ г/см}^3$.
5. Каким должен быть радиус капиллярной трубки для того, чтобы при полном смачивании вода в капилляре поднялась на 10 см ? Коэффициент поверхностного натяжения воды равен $7 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$.
6. Стальной шарик (плотность $\rho = 9 \text{ г/см}^3$) диаметром $d = 0,8 \text{ см}$ падает с постоянной скоростью в касторовом масле (плотность $\rho' = 0,96 \text{ г/см}^3$, динамическая вязкость $\eta = 0,99 \text{ Па} \cdot \text{с}$). Учитывая, что критическое значение числа Рейнольдса $Re = 0,5$, определите характер движения масла, обусловленный падением в нем шарика.

7. Общеизвестен шуточный вопрос: «Что тяжелее: тонна свинца или тонна пробки?» На сколько истинный вес пробки, которая в воздухе весит 9,8 кН, больше истинного веса свинца, который в воздухе весит также 9,8 кН? Температура воздуха $t = 17^\circ\text{C}$. давление $p = 100$ кПа.
8. Медная проволока сечением $S = 8 \text{ мм}^2$ под действием растягивающей силы удлинилась настолько, на столько она удлиняется при нагревании на 30 К. Принимая для меди модуль Юнга $E = 118 \text{ ГПа}$ и коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, определите числовое значение этой силы.

Занятие 6. Гармонические колебания. Волновые процессы

1. Однородный шарик подвешен на нити, длина которой l равна радиусу шарика R . Во сколько раз период чалых колебаний T_1 , этого маятника больше периода малых колебаний T_2 , математического маятника с таким же расстоянием от центра масс до точки подвеса?
2. Написать уравнение гармонического колебательного движения, если максимальное ускорение точки $49,3 \text{ см/с}^2$, период колебаний 2сек и смещение точки от положения камня в начальный момент времени $x_0 = 25 \text{ мм}$.
3. Амплитуда затухающих колебаний математического маятника за 2 мин уменьшилась вдвое. Во сколько раз она уменьшится за 3 мин?
4. Математический маятник совершает затухающие колебания. Длина маятника 24,7 см. Через сколько времени энергия колебаний маятника уменьшится в 10 раз? Логарифмический декремент затухания математического маятника равен 0,2.
5. Точка участвует в двух колебаниях одинакового периода с одинаковыми начальными фазами. Амплитуды колебаний $A_1 = 3 \text{ см}$ и $A_2 = 4 \text{ см}$. Найти амплитуду и фазу результирующего колебания если 1) колебания совершаются в одном направлении; 2) колебания взаимно перпендикулярны.
6. Точка участвует в двух взаимоперпендикулярных колебаниях $x = A_1 \sin \omega_1 t$ и $y = A_2 \sin \omega_2 t$, где $A_1 = 8 \text{ см}$, $A_2 = 4 \text{ см}$, $\omega_1 = 2\omega_2 \text{ с}^{-1}$. Написать уравнение траектории и построить её на чертеже; показать направление движения точки.
7. Уравнение незатухающих колебаний дано в виде $x = 10 \sin(0,5\pi t) \text{ см}$. Скорость распространения колебаний 300 м/с. Найти: 1) уравнение волны; 2) смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 0,75 см от источника колебаний, через 0,01 с после начала колебаний. 3) написать и изобразить графически колебания для точки, отстоящей на расстоянии 600 м от источника колебаний.

8. По грунтовой дороге прошёл трактор, оставив следы в виде ряда углублений, находящихся на расстоянии 30 см друг от друга. По этой дороге покатали коляску массой 10 кг, имеющую две одинаковые рессоры, каждая из которых прогибается на 2 см под действием силы в 10 Н. С какой скоростью надо катить коляску, чтобы она попала в резонанс?

Молекулярная физика и термодинамика

Основные формулы

Молекулярная физика

- ◆ *Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ):*
 - 1) любое вещество состоит из мельчайших частиц — атомов и молекул;
 - 2) молекулы и атомы находятся в непрерывном хаотичном (*тепловом*) движении;
 - 3) между молекулами и между атомами существуют силы взаимодействия.
- ◆ *Закон Авогадро.* Моли любых газов при одинаковой температуре и одинаковом давлении занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях ($p = 1,01 \cdot 10^5$ Па, $T = 273$ К) объем одного моля любого газа равен $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³/моль.
- ◆ *Закон Дальтона.* Давление смеси газов p равно сумме их парциальных давлений p_i :

$$p = \sum_{i=1}^n p_i .$$

- ◆ *Основное уравнение МКТ* для давления идеального газа:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle ,$$

где n — концентрация молекул, m_0 — масса одной молекулы, $\langle v_{\text{кв}}^2 \rangle$ — среднее значение квадрата скорости движения молекул (средне квадратичная скорость).

- ◆ Средняя кинетическая энергия $\langle E_{\text{к}} \rangle$, приходящаяся на одну молекулу, определяет *абсолютную температуру* T , измеренную по шкале Кельвина ($0^\circ\text{C} = 273,15\text{K}$):

$$\langle E_{\text{к}} \rangle = \frac{i}{2} k T ,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, i — число *степеней свободы*, т.е. число независимых переменных, с помощью которых может быть задано положение системы в пространстве. Для одноатомной молекулы $i = 3$ (три поступательные степени свободы), для двухатом-

ной молекулы $i = 5$ (три поступательные и две вращательные степени свободы), для трёхатомной молекулы $i = 6$ (три поступательные и три вращательные степени свободы)/

- ◆ Распределение молекул идеального газа по скоростям (*распределение Максвелла*):

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

где $dN(v)$ — число молекул, имеющих значение скорости в интервале от v до $v + dv$, N — общее число молекул. Наиболее вероятная скорость $v_{\text{вер}}$, средняя скорость $\langle v \rangle$ и средняя квадратичная скорость $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ определяются по формулам:

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}, \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \quad \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

- ◆ Среднее расстояние, которое проходит молекула газа от соударения до соударения, называется длиной свободного пробега $\bar{\lambda}$. Она определяется как величина, обратная числу столкновений z на единице длины, и зависит от диаметра молекулы d и концентрации молекул n :

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

- ◆ *Уравнение состояния* идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где $R = 8,31$ Дж/(кг·К) — универсальная газовая постоянная, m — масса газа, M — его молярная масса.

- ◆ *Изопроцессами* называются процессы, протекающие при условии сохранения одного из параметров состояния постоянным: *изобарический* — при постоянном давлении, *изохорический* — при постоянном объёме, *изотермический* — при постоянной температуре.

Термодинамика

- ◆ **Внутренняя энергия системы U** — это сумма кинетических энергий хаотичного движения всех молекул системы и потенциальной энергии их межмолекулярного взаимодействия. Для идеального газа потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия равна нулю, и внутренняя энергия определяется только суммарной кинетической энергией хаотичного движения молекул:

$$U = \sum_{i=1}^N E_{ki} = N \langle E_k \rangle = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$$

- ♦ **Первое начало термодинамики.** Внутреннюю энергию системы можно изменить, передав ей некоторое количество тепла δQ или совершив над ней работу δA :

$$dU = \delta Q + \delta A$$

Другая формулировка первого начала термодинамики: количество тепла δQ , переданное системе, идёт на приращение её внутренней энергии dU и на совершение системой работы над внешними телами $\delta A'$:

$$\delta Q = dU + \delta A'$$

- ♦ **Элементарная работа** δA совершается при изменении объёма газа на величину dV , при расширении газа $\delta A > 0$, при сжатии $\delta A < 0$:

$$\delta A = p dV$$

- ♦ **Полная работа** A при изменении объёма газа от V_1 до V_2 :

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

- ♦ **Количество тепла** δQ определяет энергию, переданную от одной системы другой в результате теплообмена.
- ♦ При **изотермическом** процессе внутренняя энергия системы не изменяется, и все переданное системе тепло расходуется на совершение ей работы:

$$\delta Q = +\delta A'$$

- ♦ При **изобарическом** процессе переданное системе количество тепла расходуется и на изменение внутренней энергии системы, и на совершение ей работы:

$$\delta Q = dU + p \delta V$$

- ♦ При **изохорическом** процессе переданное системе количество тепла расходуется только на изменение внутренней энергии системы:

$$\delta Q = dU$$

- ♦ **Адиабатический** процесс проходит без теплообмена системы с окружающей средой ($\delta Q = 0$), и работа совершается за счёт изменения внутренней энергии системы:

$$\delta A = -dU$$

- ♦ **Тепловой двигатель** представляет собой устройство, производящее механическую работу за счёт переданного ему тепла. В основе любого теплового двигателя лежит *круговой процесс* или *цикл*, при совершении которого система возвращается в исходное состояние. Полезная работа определяется разностью количества тепла Q_1 , полученного от нагрева-

теля, и количества тепла Q_2 , отданного холодильнику. КПД теплового двигателя:

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

- ♦ **Максимальным** КПД обладает **идеальный** тепловой двигатель, работающий по **циклу Карно** (изотермическое расширение → адиабатическое расширение с охлаждением → изотермическое сжатие при более низкой температуре → адиабатическое сжатие до первоначального состояния):

$$\eta_{ид} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

- ♦ **Теплоёмкостью** C называется физическая величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить системе, чтобы повысить ее температуру на один градус:

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

- ♦ Теплоёмкость **одного моля** вещества называется **молярной**, теплоёмкость **единицы массы** вещества называется **удельной**.
- ♦ Если процесс передачи тепла происходит при постоянном объёме, теплоёмкость называется **изохорной** и обозначается как C_V .
- ♦ Если процесс передачи тепла происходит при постоянном давлении, теплоёмкость называется **изобарной** и обозначается как C_P .
- ♦ Между **молярными** теплоёмкостям идеального газа выполняется соотношение (уравнение Майера):

$$C_P = C_V + R.$$

- ♦ Отношение молярных теплоёмкостей $\gamma = C_P / C_V$ определяет показатель адиабаты в координатах «давление — объём»:

$$pV^\gamma = const.$$

- ♦ **Приведённым количеством тепла** Q^* в термодинамическом процессе называют отношение количества тепла Q , полученного системой, к температуре теплоотдающего тела T :

$$Q^* = \int \frac{\delta Q}{T},$$

где δQ — количество тепла, сообщённое системе на элементарном участке процесса, при этом $\delta Q > 0$ при подводе тепла и $\delta Q < 0$ при отводе тепла.

- ♦ Для любого кругового процесса выполняется **неравенство Клаузиуса**:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0,$$

где знак равенства ставится для обратимого процесса, знак неравенства — для необратимого.

- ♦ **Энтропией** S называется функция состояния системы, дифференциал которой равен элементарному приведённому теплу для обратимого процесса:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

- ♦ **Необратимые процессы** идут с возрастанием энтропии (одна из формулировок *второго начала термодинамики*), так что $dS = \frac{\delta Q}{T} \geq 0$. Объединяя первое и второе начала, можно записать **основное соотношение термодинамики**:

$$TdS \geq dU + \delta A.$$

- ♦ Используя выражения для внутренней энергии и теплоёмкости идеального газа, получаем формулу для расчёта изменения энтропии идеального газа при переходе из состояния 1 в состояние 2:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{m}{M} c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

- ♦ Энтропия характеризует степень упорядоченности системы и связана с *термодинамической вероятностью* (*статистическим весом*) Ω состояния формулой (*формула Больцмана*):

$$S = k \ln \Omega.$$

Явления переноса

- ♦ **Явлением теплопроводности** называется перенос тепла (внутренней энергии), оно возникает при наличии градиента температуры и в одномерном случае ($T = T(x)$) описывается **уравнением Фурье**:

$$dQ = -\chi \frac{dT}{dx} dS dt,$$

где dQ — количество тепла, переносимое за время dt через площадку dS в направлении нормали x к этой площадке, $\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры, χ — коэффициент теплопроводности. Значение χ определяется скоростью теплового движения $\langle v \rangle$, средней длиной свободного пробега $\bar{\lambda}$, плотностью газа ρ и изохорной удельной теплоёмкостью c_v :

$$\chi = \frac{1}{3} \langle v \rangle \bar{\lambda} \rho c_v.$$

- ♦ **Явление внутреннего трения** связано с возникновением сил трения между слоями газа или жидкости, скользящими относительно друг дру-

га. Величина силы внутреннего трения dF между соприкасающимися слоями площадью dS , скользящими вдоль направления x , определяется потоком импульса $\frac{dP_x}{dt}$, переносимым через площадку dS в направлении нормали z к этой площадке. Сила внутреннего трения может быть описана *уравнением Ньютона*:

$$dF = -\eta \frac{dv_x}{dz} dS,$$

где $\frac{dv_x}{dz}$ — градиент скорости движения слоёв по направлению z , η — коэффициент вязкости. Значение коэффициента вязкости определяется средней скоростью теплового движения $\langle v \rangle$, средней длиной свободного пробега $\bar{\lambda}$, плотностью газа ρ :

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \bar{\lambda} \rho.$$

- ♦ **Диффузией** называется обусловленное тепловым движением молекул самопроизвольное выравнивание концентраций в смеси нескольких различных веществ, т.е. перенос массы. В одномерном стационарном случае диффузия одного компонента подчиняется *закону Фика*:

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dS dt,$$

где dM — масса компонента, переносимая за время dt через площадку dS в направлении нормали x к этой площадке, $\frac{d\rho}{dx}$ — градиент плотности данного компонента по направлению x , D — коэффициент диффузии. Значение коэффициента диффузии определяется скоростью теплового движения $\langle v \rangle$ и средней длиной свободного пробега $\bar{\lambda}$:

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

Примеры решения задач

1. Баллон ёмкостью 40 литров заполнен азотом. Температура азота 300 К. Когда часть азота израсходовали, давление в баллоне понизилось на 400 кПа. Определите массу израсходованного азота.

Дано: $V = 40 \text{ л} = 0,04 \text{ м}^3$, $T = 300 \text{ К}$, $p_2 = 400 \text{ кПа}$; $\mu(\text{N}_2) = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Найти: Δm —?

Решение:

Для решения воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная.

Тогда из (1) напишем выражения для масс газа в обоих состояниях:

$$m_1 = \frac{p_1 V \mu}{RT} \quad m_2 = \frac{p_2 V \mu}{RT},$$

откуда масса израсходованного газа определим в предположении, что процесс изотермический:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{(p_1 - p_2) V \mu}{RT} = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 300} = 0,18 \text{ кг}$$

Ответ: 0,18 кг.

2. По функции распределения молекул по скоростям определите среднюю квадратичную скорость.

Решение

Функция распределения молекул по скоростям имеет вид:

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

где m_0 — масса молекулы; T — термодинамическая температура;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана,

Среднюю квадратичную скорость можно представить как

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$$

Найдем среднее значение квадрата скорости как

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^\infty v^2 f(v) dv = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^\infty v^4 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} dv$$

Табличный интеграл

$$\int_0^\infty x^4 e^{-\alpha x^2} dx = \frac{3}{8} \sqrt{\pi} a^{-5/2}.$$

В нашем случае:

$$x = v \quad a = \frac{m_0}{2kT}$$

Тогда

$$\langle v^2 \rangle = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot \frac{3}{8} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{-5/2} = 3 \cdot \left(\frac{m_0}{kT} \right)^{-1} = \frac{3kT}{m_0}$$

и

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Ответ: $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$

3. Вычислите молярные и удельные теплоёмкости идеального газа, масса 1 киломоля которого равна 32 кг, а отношение теплоёмкостей $c_p / c_v = 1,4$. Здесь c_p — теплоёмкость газа при постоянном давлении, c_v — теплоёмкость при постоянном объёме.

Дано: $\nu = 1$ кмоль, $m = 32$ кг, $c_p / c_v = 1,4$

Найти: $c_{p\mu}$, $c_{p\gamma\delta}$, $c_{v\mu}$, $c_{v\gamma\delta}$,

Решение:

Из уравнения Майера $c_{p\mu} = c_{v\mu} + R$.

Здесь $c_{p\mu}$ и $c_{v\mu}$ — молярные теплоёмкости при постоянном давлении и постоянном объёме соответственно. $R = 8,31$ Дж/(моль·К)

Тогда:

$$\frac{c_{p\mu}}{c_{v\mu}} = \frac{c_{v\mu} + R}{c_{v\mu}} = 1,4$$

$$0,4c_{v\mu} = R$$

$$c_{v\mu} = \frac{R}{0,4} = \frac{8,31}{0,4} = 20,78 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$c_{p\mu} = c_{v\mu} + R = 20,78 + 8,31 = 29,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Теперь найдем удельные теплоёмкости из соотношения:

$$c_{\mu} = \mu \cdot c_{\gamma\delta}.$$

Здесь c_{μ} и $c_{\gamma\delta}$ — соответственно молярная и удельная теплоёмкости;

$$\mu = \frac{m}{\nu} = \frac{32 \text{ кг}}{10^3 \text{ моль}} = 0,032 \text{ кг / моль} \text{ — молярная масса газа.}$$

Тогда

$$c_{v\gamma\delta} = 0,032 \cdot 20,78 = 0,66 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_{p\gamma\delta} = 0,032 \cdot 29,1 = 0,93 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Ответ: $c_{p\mu} = 29,1$ Дж/(моль·К), $c_{p\gamma\delta} = 0,93$ Дж/(кг·К), $c_{v\mu} = 20,78$ Дж/(моль·К), $c_{v\gamma\delta} = 0,66$ Дж/(кг·К)

4. Идеальный газ совершает цикл Карно. Работа A_1 изотермического расширения газа равна 5 Дж. Определите работу A_2 изотермического сжатия, если КПД цикла равен 0,2.

Дано: $A_1 = 5 \text{ Дж}$, $\eta = 0,2$

Найти: A_2 — ?

Решение:

Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат.

При изотермическом процессе вся поступающая теплота идет на совершение работы, то есть

$$A_1 = Q_1$$

$$A_2 = Q_2$$

В данном случае Q_1 — теплота, полученная нагревателем, Q_2 — теплота, отданная холодильнику.

Термический КПД цикла

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

$$A_2 = Q_2 = Q_1(1 - \eta) = 5 \cdot (1 - 0.2) = 4 \text{ Дж}$$

Ответ: 4 Дж.

5. В результате изохорного нагревания водорода массой 1 г давление газа увеличилось в два раза. Определите изменение энтропии газа.

Дано: $V = \text{const}$, $m = 10^{-3} \text{ кг}$, $p_2/p_1 = 2$.

Найти: ΔS — ?

Решение

Определим изменение энтропии как

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T},$$

Где теплота dQ при изохорном процессе

$$dQ = c_V m dT.$$

Здесь

$$c_V = \frac{c_{V\mu}}{\mu} = \frac{i}{2\mu} R \text{ — удельная теплоёмкость газа;}$$

$$c_{V\mu} = \frac{i}{2} R \text{ — молярная теплоёмкость газа}$$

i — число степеней свободы молекулы газа. Так как водород является двухатомным газом, то его молекула обладает тремя поступательными и двумя вращательными степенями свободы, то есть $i = 5$.

$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ — универсальная газовая постоянная.

$M = 0,002 \text{ кг}/\text{моль}$ — молярная масса водорода.

Тогда

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_V m dT}{T} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Так как процесс изохорный, то по закону Шарля

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

и

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta S = \frac{10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot \ln 2 = 7,2 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Ответ: 7,2 Дж/К.

Занятие 7. Газовые законы

1. Определить массу газа в баллоне емкостью 90 л при температуре 295 К и давлении $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, если его плотность при нормальных условиях $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$.
2. Во сколько раз вес воздуха, заполняющего помещение зимой (7°C) больше его веса летом (37°C)?
3. Определить число N молекул, содержащихся в объёме $V = 1 \text{ мм}^3$ воды, и массу m_0 молекулы воды.
4. 10 г кислорода находится под давлением 3 атм при температуре 10°C . Вследствие изобарного расширения газ занял объём 10 л. Найти температуру газа после расширения.
5. В сосуде находится 14 г азота и 9 г водорода при температуре 10°C и давлении 10^6 Па . Найти молярную массу и плотность смеси газов.
6. Вычислить температуру, при которой энергия теплового движения молекул не будет достаточна для того, чтобы молекулы преодолели силу земного притяжения и навсегда покинули планету.
7. Определить плотность ρ насыщенного водяного пара в воздухе при температуре $T = 300 \text{ К}$. Давление p насыщенного водяного пара при этой температуре равно $3,55 \text{ кПа}$.
8. Оболочка воздушного шара имеет вместимость $V = 1600 \text{ м}^3$. Найти подъёмную силу F водорода, наполняющего оболочку, на высоте, где давление $p = 60 \text{ кПа}$ и температура $T = 280 \text{ К}$. При подъёме шара водород может выходить через отверстие в нижней части шара.

Занятие 8. Статистические распределения

1. Найти среднее число столкновений в 1 секунду молекул азота при температуре 27°C и давлении 400 мм рт.ст.
2. На какой высоте плотность воздуха в 2 раза меньше, чем его плотность на уровне моря? Считать, что температура воздуха везде одинакова и равна 273 К.
3. Определить, во сколько раз отличаются коэффициенты диффузии азота ($M_1 = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) и углекислого газа ($M_2 = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль), если оба газа находятся при одинаковых температуре и давлении. Эффективные диаметры молекул этих газов считать одинаковыми.
4. Определите, во сколько раз отличаются коэффициенты динамической вязкости η углекислого газа и азота, если оба газа находятся при одинаковых температуре и давлении. Эффективные диаметры молекул этих газов считать равными.
5. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул воздуха при нормальных условиях. Диаметр молекулы $d = 0,3$ нм.
6. Плотность газа $\rho = 0,06$ кг/м³, средняя квадратичная скорость его молекул $v_{\text{кв}} = 500$ м/с. Какое давление оказывает газ на стенки сосуда?
7. Барометр в кабине летящего самолёта все время показывает одинаковое давление $p = 79$ кПа, благодаря чему лётчик считает высоту h_1 полёта неизменной. Однако температура воздуха за бортом самолёта изменилась с $t = 5^{\circ}\text{C}$ до $t = 1^{\circ}\text{C}$. Какую ошибку Δh в определении высоты допустил лётчик? Давление p_0 у поверхности Земли считать нормальным.
8. На какой высоте h над поверхностью земли атмосферное давление вдвое меньше, чем на её поверхности? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не изменяется с высотой.

Занятие 9. Основы термодинамики

1. Температура воздуха в комнате объёмом 70 м³ была 280 К. После того, как протопили печь, температура поднялась до 296 К. Найдите работу воздуха при расширении, если давление постоянно и равно 100 кПа.
2. Определить молярную массу газа, если при изохорном нагревании на 10°C 20 г газа требуется 630 Дж теплоты, а при изобарном — 1050 Дж.
3. Углекислый газ, находящийся при температуре 450 К и давлении 0,5 МПа, расширяется адиабатно до тройного объема. Найти температуру и давление газа после расширения.
4. Найти удельную теплоемкость газовой смеси, состоящей из 3 киломолей аргона и 3 киломолей азота. Найти постоянную адиабаты для этой смеси.

5. Одна и та же масса двухатомного идеального газа сжимается один раз изотермически, а второй раз адиабатно. Начальные параметры газа в обоих случаях одинаковы. Найти отношение работы сжатия при адиабатном процессе к работе при изотермическом процессе, если в обоих процессах объем уменьшился в три раза.
6. Давление одноатомного газа увеличилось в 6 раз, а объем уменьшился в 2 раза. Как изменится внутренняя энергия?
7. При адиабатном сжатии температура газа увеличилась от 300 К до 1200 К. Во сколько раз уменьшился объем смеси, если $\gamma = 1,5$?
8. Определить молярную массу газа, если при изохорном нагревании 20 г газа на 10° требуется 630 Дж теплоты, а при изобарном — 1050 Дж.

Занятие 10. Основы термодинамики (продолжение)

1. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Воздух при давлении $p = 7$ атм и температуре $t = 127^\circ\text{C}$ занимает объем $V_1 = 2$ л. После изотермического расширения воздух занял объем $V_2 = 5$ л; после адиабатического расширения объем стал равным $V_3 = 8$ л. Найти: а) координаты пересечения изотерм и адиабат; б) работу, совершаемую на каждом участке цикла; в) полную работу, совершаемую за весь цикл; г) к.п.д. цикла; д) количество теплоты, полученное от нагревателя за один цикл; е) количество теплоты, отданное холодильнику за один цикл.
2. Тепловая машина за 1 цикл получает от нагревателя количество теплоты 10 Дж и отдает холодильнику 4 Дж. Каков КПД машины?
3. Газ в количестве 1 моль совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Наименьший объем газа 10 л, наибольший - 20 л. Наименьшее давление 2,5 атмосферы, наибольшее — 5 атмосфер. Найдите работу за цикл.
4. Тепловая машина работает по циклу Карно и за счет каждого из 4,2 кДж, полученного от нагревателя, совершает работу 1,7 кДж. Температура холодильника равна 20°C . Какова температура нагревателя?
5. В идеальной тепловой машине за счёт каждого кДж энергии получаемой от нагревателя, совершается работа 300 Дж. Определите КПД машины и температуру нагревателя, если температура холодильника 280 К.
6. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изобарном охлаждении от 300 К до 250 К?
7. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изохорном нагревании от 250 до 300 К?
8. Лёд массой 2 кг при температуре -13°C нагревается до 0°C и превращается в воду. Найти изменение энтропии. Удельная теплоёмкость

льда $C_{уд} = 2,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), удельная теплота плавления льда $\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Занятие 11. Явления переноса. Реальные газы

1. Найти коэффициент диффузии водорода при нормальных условиях, если средняя длина свободного пробега при этих условиях равна $1,6 \cdot 10^{-7}$ м.
2. Найти среднюю длину свободного пробега молекул гелия при давлении 101,3 кПа и температуре 0°C , если вязкость гелия $\eta = 13$ мкПа·с.
3. Определите массу азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку 50 см^2 за 20 с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном площадке, равен 1 кг/м^4 . Температура азота 290 К, а средняя длина свободного пробега его молекул равна 1 мкм.
4. Азот находится под давлением 10 кПа при температуре 290 К. Определите коэффициент внутреннего трения, если коэффициент диффузии при этих условиях составляет $9,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.
5. Найти наименование в единицах СИ постоянных a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса.
6. Какую температуру имеет 2 г азота, занимающего объём 820 см^3 при давлении 0,2 МПа? Газ рассматривать как: а) идеальный; б) реальный.

Электростатика

Основные формулы

Электростатическое поле в вакууме

- ♦ Закон Кулона $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}; \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}.$
- ♦ Закон сохранения заряда $\sum q_i = \text{const}.$
- ♦ Напряжённость электростатического поля $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \quad E = \frac{F}{q} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$
- ♦ Принцип суперпозиции $\vec{E} = \sum \vec{E}_i.$
- ♦ Линейная плотность заряда $\tau = dq/dl.$
- ♦ Поверхностная плотность заряда $\sigma = dq/dS.$
- ♦ Объёмная плотность заряда $\rho = dq/dV.$
- ♦ Электрический момент диполя $\vec{p} = q\vec{l}.$

Теорема Остроградского-Гаусса и её применение

- ◆ Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

- для одного заряда $\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{q}{\epsilon_0};$

- для нескольких зарядов $\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV.$

- ◆ Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью $E = \sigma / 2\epsilon_0.$
- ◆ Напряжённость поля, создаваемого двумя параллельными разноименно заряженными бесконечными плоскостями $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$
- ◆ Напряжённость поля нити (цилиндра) и напряжённости поля между двумя цилиндрами выражается по одной формуле $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}.$
- ◆ Напряжённость поля между двумя цилиндрами $E = \lambda / 2\pi\epsilon_0 r.$

Потенциал и работа электростатического поля. Связь напряжённости с потенциалом

- ◆ Работа по перемещению заряда q из точки 1 в точку 2

$$dA = Fdl \cos \alpha; \quad A = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}; \quad A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

- ◆ Теорема о циркуляции вектора напряжённости $\vec{E}$: $\oint \vec{E} d\vec{l} = 0.$
- ◆ Потенциальная энергия взаимодействия двух зарядов $W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}.$
- ◆ Потенциал электростатического поля $\varphi = \frac{W}{q} = \frac{A_\infty}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}.$
- ◆ Потенциал системы зарядов $\varphi = \sum \varphi_i.$
- ◆ Связь между потенциалом и напряжённостью $\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \quad \vec{E} = -\nabla\varphi.$
- ◆ Потенциал поля диполя $\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} \cos \alpha.$
- ◆ Потенциальная энергия диполя $W = -\vec{p}\vec{E} = pE \cos \alpha.$
- ◆ Механический момент, действующий на диполь в электростатическом поле $\vec{M} = [\vec{p}, \vec{E}]$ или $M = pE \cos \alpha.$
- ◆ Работа в потенциальном поле $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU.$

Диэлектрики в электростатическом поле

- ♦ Результирующее поле внутри диэлектрика $E = E_0 - E'$.
- ♦ Электрический момент одной молекулы $\vec{p}_1 = q\vec{l}$.
- ♦ Вектор поляризации $\vec{P} = \sum \vec{p}_1 = n\vec{p}_1 = n\alpha\epsilon_0\vec{E} = \chi\epsilon_0\vec{E}$.
- ♦ Диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 1 + \chi$; $\epsilon = \frac{E_0}{E}$.
- ♦ Вектор электрического смещения (электрическая индукция)
$$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}.$$
- ♦ Связь вектора $\vec{D}$ с напряжённостью и поляризуемостью $\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}$.
- ♦ Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i.$$

Проводники в электростатическом поле

- ♦ Электростатическое экранирование $\frac{d\phi}{dl} = -E = 0$; $\phi = \text{const}$.
- ♦ Электрическая ёмкость уединённого проводника $C = \frac{q}{\phi}$.
- ♦ Электрическая ёмкость шара $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$.
- ♦ Электрическая ёмкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$.
- ♦ Ёмкость параллельно соединённых конденсаторов $C = \sum_{i=1}^n C_i$.
- ♦ Ёмкость последовательно соединённых конденсаторов $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$.
- ♦ Энергия взаимодействия двух зарядов $W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} = \frac{1}{2}(q_1\phi_1 + q_2\phi_2)$.
- ♦ Энергия заряженного уединённого проводника $W = \frac{C\phi^2}{2} = \frac{q\phi}{2} = \frac{q^2}{2C}$.
- ♦ Энергия заряженного конденсатора $W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$.
- ♦ Объёмная плотность энергии $w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}$.
- ♦ Пондермоторные силы в конденсаторе $F = \frac{q^2}{2\epsilon\epsilon_0 S}$.

Примеры решения задач

1. Может ли заряд любой системы заряженных частиц быть равным $7,2 \cdot 10^{-19}$ Кл?

Дано: $q = 7,2 \cdot 10^{-19}$ Кл, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Решение:

Заряд любой системы заряженных частиц быть кратен элементарному заряду, т.е., заряду электрона. То есть должно выполняться равенство:

$$q = Ne,$$

N — целое положительное число.

Применительно к данной задаче

$$N = \frac{q}{e} = \frac{7,2 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,5.$$

Так как получилось дробное число, такая система существовать не может.

Ответ: не может

2. Электрон влетает в плоский горизонтальный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью $1 \cdot 10^7$ м/с. Напряженность поля в конденсаторе 100 В/см. Длина пластин 5 см. Найдите величину скорости электрона при вылете его из конденсатора. Масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Результат представьте в мегаметрах в секунду (1 Мм/с = 10^6 м/с) и округлите до десятых.

Дано: $v_0 = 1 \cdot 10^7$ м/с, $E = 100$ В/см, $l = 5$ см, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Найти: v

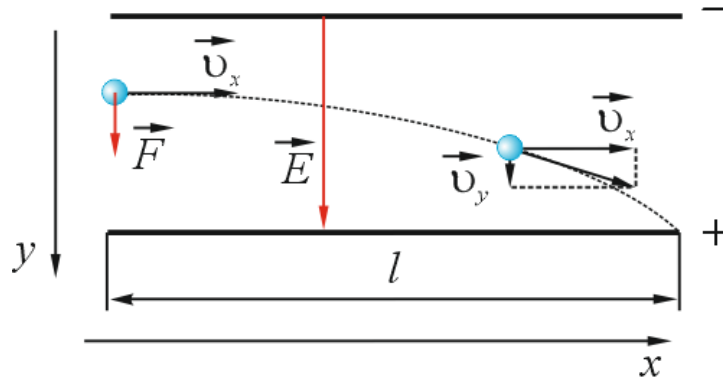
Решение:

Допустим, что сила сопротивления воздуха и сила тяжести, действующая на электрон пренебрежимо малы.

Тогда на электрон будет действовать только кулоновская сила, направленная к положительно заряженной пластине, находящаяся внизу согласно рисунка.

Это означает, что в направлении оси x электрон движется равномерно со скоростью $v_x = v_0$, и ускоренно в направлении оси y .

Закон изменения скорости в вертикальном направлении



$$v_y = at.$$

Ускорение a найдём из соотношения:

$$eE = m_e a$$

$$a = eE/m_e.$$

Время движения электрона найдём из условия:

$$l = v_x t$$

$$t = l/v_x$$

Тогда вертикальную составляющую скорости найдём как:

$$v_y = \frac{eE}{m_e} \cdot \frac{l}{v_x}$$

Проверка размерности:

$$[v] = \frac{[e] \cdot [E]}{[m_e]} \cdot \frac{[l]}{[v_x]} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{м} \cdot \text{кг}} \cdot \frac{\text{м} \cdot \text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Рассчитаем вертикальную составляющую скорости:

$$v_y = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}{9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-2}}{10^7} = 0,88 \cdot 10^7 = 8,8 \text{ Мм/с}$$

Определим результирующую скорость по теореме Пифагора:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 10^6 \sqrt{10^2 + 8,8^2} = 13,2 \text{ Мм/с}$$

Ответ: 13,2 Мм/с

Занятие 12. Постоянное электрическое поле в вакууме

1. Два шарика одинакового объёма, обладающие массой $0,6 \cdot 10^{-3}$ кг каждый, подвешены на шёлковых нитях длиной 0,4 м так, что их поверхности соприкасаются. Угол, на который разошлись нити при сообщении шарикам одинаковых зарядов, равен 60° . Найти величину зарядов и силу электрического отталкивания. Пояснить рисунком.
2. На двух одинаковых каплях масла находится по 100 лишним электронам. Сила электрического отталкивания уравновешивается силой их

взаимного тяготения. Найти объем каждой капельки, если плотность масла $0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

3. Сколько электронов содержит заряд пылинки с массой 10^{-11} кг , если она удерживается в равновесии в горизонтально расположенном плоском конденсаторе? Расстояние между обкладками конденсатора 1 см, разность потенциалов на обкладках 100 В.
4. Расстояние между двумя точечными зарядами $+3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ и $-3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ равно $r = 1 \text{ см}$. Найти напряжённость поля в точке, находящейся на перпендикуляре, восстановленном к середине линии, соединяющей оба заряда на расстоянии 1 см от неё.
5. Бесконечно длинная прямая нить заряжена равномерно с линейной плотностью $0,4 \text{ мКл/м}$. Вычислить разность потенциалов точек 1 и 2, если точка 2 находится дальше от нити, чем точка 1, в 2 раза.
6. К двум очень длинным параллельным пластинам приложено напряжение 6 кВ. Поверхностная плотность зарядов на пластинах $3,2 \text{ мКл/м}^2$. Определить расстояние между пластинами и напряжённость поля между пластинами и вне пластин.
7. Две бесконечно длинные равномерно заряженные нити с линейной плотностью зарядов $6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}$ расположены на расстоянии 0,2 м друг от друга. Найти напряжённость электрического поля, созданного в точке, удалённой на 0,2 м от каждой нити.
8. Электрон, пролетев в поле с разностью потенциалов 10^4 В , попадает в плоский конденсатор длиной 10 см и движется в первый момент параллельно пластинам на равном расстоянии от них. Расстояние между пластинами 2 см, разность потенциалов между ними 300 В. Определить вертикальное смещение электрона при вылете из конденсатора.

Занятие 13. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле. Электроёмкость. Энергия электрического поля

1. На пластинах плоского воздушного конденсатора с площадью пластин 150 см^2 находится заряд $5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$. Какова сила взаимного притяжения между пластинами и объёмная плотность энергии поля конденсатора?
2. Батарея из последовательно соединённых конденсаторов ёмкостью 10^{-9} и $5 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ заряжена до напряжения 2 кВ. Какое количество электричества запасено в батарее?
3. Два плоских воздушных конденсатора одинаковой электроёмкости соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов $U = 300 \text{ В}$. Определите разность потенциалов этой системы, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнено слюдой ($\epsilon = 7$).
4. При последовательном соединении трёх различных конденсаторов ёмкость цепи $C = 0,75 \text{ мкФ}$, а при параллельном соединении ёмкость цепи $C = 1 \text{ мкФ}$. Найти ёмкости конденсаторов C_2 и C_3 и напряжения на

- них U_2 и U_3 (при последовательном соединении), если ёмкость конденсатора $C_1 = 3$ мкФ, а напряжение на нем $U_1 = 20$ В.
5. Два одинаковых воздушных конденсатора ёмкостью 100 пФ соединены последовательно и подключены к источнику тока с напряжением $U = 20$ В. Как изменится заряд на конденсаторах, если один из них погрузить в диэлектрик с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$?
 6. Шар, погруженный в керосин, имеет потенциал $\varphi = 4,5$ кВ и поверхностную плотность заряда $\sigma = 11,3$ мкКл/м². Найти радиус R , заряд Q , ёмкость C и энергию W шара.
 7. Плоский конденсатор заполнен диэлектриком и на его пластины подана некоторая разность потенциалов. Его энергия при этом $W = 20$ мкДж. После того, как конденсатор отключили от источника напряжения, диэлектрик вынули из конденсатора. Работа, которую надо было совершить, против сил электрического поля, чтобы вынуть диэлектрик, равна 70 мкДж. Найти диэлектрическую проницаемость ε диэлектрика.
 8. Конденсаторы электроёмкостями $C_1 = 1$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ, $C_3 = 3$ мкФ включены в цепь с напряжением $U = 1,1$ кВ. Определить энергию каждого конденсатора в случаях: 1) последовательного их включения; 2) параллельного включения.

Занятие 14. Диэлектрики в электростатическом поле

1. К пластинам плоского воздушного ($\varepsilon_1 = 1$) конденсатора приложена разность потенциалов $1,5$ кВ. Площадь пластин 150 см² и расстояние между ними 5 мм. После отключения конденсатора от источника напряжения в пространство между пластинами внесли стекло ($\varepsilon_2 = 7$). Определить: 1) разность потенциалов между пластинами после внесения диэлектрика; 2) электроёмкости конденсатора до и после внесения диэлектрика; 3) поверхностные плотности заряда на пластинах до и после внесения диэлектрика.
2. Между обкладками плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов $1,5$ кВ, зажата парафиновая пластинка ($\varepsilon = 2$) толщиной 5 мм. Определить поверхностную плотность связанных зарядов на парафине.
3. Определите поверхностную плотность связанных зарядов на слюдяной пластинке ($\varepsilon = 7$) толщиной $d = 1$ мм, служащей изолятором плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами конденсатора $U = 300$ В.
4. Сплошной шар из диэлектрика радиусом $R = 5$ см заряжен равномерно с объёмной плотностью $\rho = 10$ нКл/м³. Определите энергию электростатического поля, заключённую в окружающем шар пространстве.

5. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено слюдой ($\epsilon = 7$). Площадь пластин конденсатора составляет 50 см^2 . Определите поверхностную плотность связанных зарядов на слюде, если пластины конденсатора притягивают друг друга с силой 1 мН .
6. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора $U = 100 \text{ В}$. Площадь каждой пластины $S = 200 \text{ см}^2$, расстояние между пластинами $d = 0,5 \text{ мм}$, пространство между ними заполнено парафином ($\epsilon = 2$). Определите силу притяжения пластин друг к другу.
7. В однородное электростатическое поле напряжённостью $E_0 = 700 \text{ В/м}$ перпендикулярно полю поместили стеклянную пластинку ($\epsilon = 7$) толщиной $d = 1,5 \text{ мм}$ и площадью 200 см^2 . Определите: 1) поверхностную плотность связанных зарядов на стекле; 2) энергию электростатического поля, сосредоточенную в пластине.
8. Электроёмкость C плоского конденсатора 111 пФ . Диэлектрик — фарфор ($\epsilon = 6$). Конденсатор зарядили до разности потенциалов $U = 600 \text{ В}$ и отключили от источника напряжения. Какую работу A нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора? Трение пренебрежимо мало.

Постоянный электрический ток

Основные формулы

- ♦ Сила постоянного тока $I = \frac{q}{t}$.
- ♦ Сила тока $I = \frac{\partial q}{\partial t} = \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$.
- ♦ Плотность тока $j = \frac{I}{S}$.
- ♦ Вектор плотности тока при двух видах носителей тока

$$\vec{j} = q_+ n_+ \vec{u}_+ + q_- n_- \vec{u}_-.$$
- ♦ Подвижность $\bar{u} = \frac{\vec{v}}{E}$, где v — скорость движения заряда, E — напряжённость электрического поля.
- ♦ Уравнение непрерывности в интегральной форме $\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial q}{\partial t}$.
- ♦ Электродвижущая сила, действующая в цепи $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$, $\mathcal{E} = \oint_L E_{\text{ст}} dl$.
- ♦ Сопротивление при последовательном соединении $R = \sum R_i$.

- ◆ Сопротивление при параллельном соединении $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$.
- ◆ Сопротивление однородного проводника $R = \frac{\rho l}{S}$.
- ◆ Зависимость удельного сопротивления от температуры $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$.
- ◆ Проводимость $G = \frac{1}{R}$, удельная проводимость $\sigma = \frac{1}{\rho}$
- ◆ Закон Ома в интегральной форме для *однородного участка* цепи $I = \frac{U}{R}$.
- ◆ Закон Ома в дифференциальной форме $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}$.
- ◆ Закон Ома для *неоднородного участка* цепи $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathbf{E}_{12}}{R + r}$.
- ◆ Закон Ома для *замкнутой* (полной) цепи $I = \frac{\mathbf{E}}{R + r}$.
- ◆ Ток короткого замыкания $I_{кз} = \frac{\mathbf{E}}{r}$.
- ◆ Работа силы электрического поля $A = RI^2 t$.
- ◆ Мощность тока $P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$.
- ◆ Максимальная мощность, выделяемая источником тока во внешней цепи $P_{\max} = \frac{\mathbf{E}^2}{4r}$.
- ◆ Мощность, выделяемая в единице объёма проводника $w = \rho j^2$.
- ◆ Закон Джоуля-Ленца в *интегральной* форме $dQ = IU dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$.
- ◆ Закон Джоуля-Ленца в *дифференциальной* форме $w = jE = \sigma E^2$.
- ◆ КПД источника тока $\eta = \frac{A_{\Pi}}{A_3} = \frac{N_{\Pi}}{N_3} = \frac{U}{\mathbf{E}} = \frac{R}{R + r}$.
- ◆ Первое *правило* Кирхгофа $\sum_k I_k = 0$.
- ◆ Второе *правило* Кирхгофа $\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathbf{E}_k$.
- ◆ Плотность тока в газах $\vec{j} = nq(\vec{u}^+ + \vec{u}^-)$, $\vec{u}$ — подвижность.
- ◆ Закон Ома в дифференциальной форме для тока в газах $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}^*)$.

♦ Электрическое сопротивление проводника $R = \frac{2m}{e^2 n \tau} \cdot \frac{l}{S}$.

Примеры решения задач

1. Для обогрева комнаты пользуются электрической печью, включённой в сеть напряжением $U = 220$ В. Комната теряет в сутки $Q_{\text{тепл}} = 87,4$ МДж тепла. Требуется поддерживать температуру комнаты постоянной. Определить: 1) сопротивление печи; 2) сколько метров нихромовой проволоки диаметром $d = 1$ мм пошло на изготовление такой печи (удельное сопротивление нихрома $\rho = 10^{-6}$ Ом·м); 3) мощность печи.

Дано: $U = 220$ В; $Q_{\text{тепл}} = 87,4$ МДж; $T = \text{const}$; $d = 1$ мм; $\rho = 10^{-6}$ Ом·м

Найти: 1) $R = ?$; 2) $l = ?$; 3) $P = ?$

Решение:

1). По закону Ома для однородного участка цепи $I = \frac{U}{R}$

Отсюда $R = \frac{U}{I}$, где I — сила тока в цепи

По закону Джоуля – Ленца при прохождении тока по проводнику сопротивлением R в течении времени t выделяется количество теплоты равное:

$$Q_{\text{тепл}} = I^2 R t$$

Тогда

$$I = \sqrt{\frac{Q_{\text{тепл}}}{R t}}$$

Таким образом

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U \sqrt{R t}}{\sqrt{Q_{\text{тепл}}}}$$

Решаем это уравнение и найдём

$$R^2 = \frac{U^2 R t}{Q_{\text{тепл}}} \Rightarrow R = \frac{U^2 t}{Q_{\text{тепл}}}$$

Произведём проверку единиц величин

$$Ом = \frac{В^2 \cdot с}{Дж} = \frac{\frac{Дж^2}{Кл^2} \cdot с}{Дж} = \frac{Дж \cdot с}{А^2 \cdot с^2} = \frac{Дж}{Кл \cdot А} = \frac{В}{А} = Ом$$

Подставим исходные данные и произведём вычисления

$$R = \frac{(220)^2 \cdot (24 \cdot 3600)}{87,4 \cdot 10^6} = 47,8 Ом$$

2). Сопротивление нихромовой проволоки зависит от длины проволоки l , площади её поперечного сечения S и материала:

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

Отсюда

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} \quad \text{или} \quad l = \frac{R \pi d^2}{4 \rho}$$

Подставим исходные и справочные данные и произведём вычисления:

$$l = \frac{47,8 \cdot \pi \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-6}} = 37,6 \text{ м}$$

3) Мощность электропечи можно определить как мощность постоянного тока силой I , текущего по проволоке т.е.

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Тогда получим

$$P = \frac{(220)^2}{47,8} = 10^3 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт}$$

Ответ: 1) сопротивление электропечи $R = 47,8 \text{ Ом}$; 2) длина нихромовой проволоки $l = 37,6 \text{ м}$; 3) мощность электропечи $P = 1 \text{ кВт}$.

2. Электрическая цепь термостата технологической установки состоит из нагревателя сопротивлением $R_1 = 40 \text{ Ом}$ и двух сопротивлений по $R_2 = R_3 = 200 \text{ Ом}$, соединённых между собой параллельно. Цепь подключена к источнику тока с ЭДС $\varepsilon = 150 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 10 \text{ Ом}$. В результате неисправности произошло замыкание точек А и В. Оцените возможность пожара при аварии, если известно, что воспламенение произойдёт при мощности нагревателя в два раза большей номинальной.

Дано: $R_1 = 40 \text{ Ом}$; $R_2 = R_3 = 200 \text{ Ом}$; $\varepsilon = 150 \text{ В}$; $r = 10 \text{ Ом}$.

Найти: $\frac{P'_n}{P_n} = ?$

Решение. Номинальная мощность нагревателя будет равна

$$P_n = I_1^2 R_1$$

По закону Ома для замкнутой цепи получим

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_{\text{общ}} + r}$$

где R – общее внешнее сопротивление цепи;

Внешнее сопротивление можно найти заменив участок цепи с R_2 и R_3 на эквивалентное сопротивление R_{23} , включённое последовательно с R . По закону параллельного соединения резисторов

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R_2}{2}$$

Тогда $R_{\text{общ}} = R_{23} + R_1$

$$P_{\text{н}} = \frac{\varepsilon^2 R_1}{\left(\frac{R_2}{2} + R_1 + r\right)^2}$$

Подставим исходные данные и вычислим номинальную мощность нагревателя:

$$P_{\text{н}} = \frac{(150)^2 \cdot 40}{\left(\frac{200}{2} + 40 + 10\right)^2} = 40 \text{ Вт}$$

При замыкании точек А и В сила тока возрастёт и станет равной

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}$$

Тогда мощность нагревателя $P'_{\text{н}}$ увеличится

$$P'_{\text{н}} = \frac{\varepsilon^2 R_1}{(R_1 + r)^2}$$

Вычислим $P'_{\text{н}}$

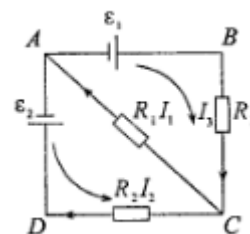
$$P'_{\text{н}} = \frac{(150)^2 \cdot 40}{(40 + 10)^2} = 360 \text{ Вт}$$

Таким образом мощность нагревателя в результате аварии увеличилась в $\frac{P'_{\text{н}}}{P_{\text{н}}} = \frac{360}{40} = 9$ раз, что может привести к воспламенению технологической установки.

Ответ: отношение аварийной мощности нагревателя $P'_{\text{н}}$ к номинальной $P_{\text{н}}$ равно 9, что означает воспламенение технологической установки.

Занятие 15. Постоянный электрический ток

1. Имеется моток медной проволоки площадью поперечного сечения $0,1 \text{ мм}^2$. Масса всей проволоки $0,3 \text{ кг}$. Определить сопротивление проволоки.
2. В схеме $\varepsilon_1 = 2,1 \text{ кВ}$, $\varepsilon_2 = 1,9 \text{ кВ}$, $R_1 = 45 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$. Найти силу тока во всех участках цепи. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.
3. ЭДС батареи равна 18 В . КПД батареи составляет $0,9$ при силе тока $4,5 \text{ А}$. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?
4. Электропечь должна выпаривать за 5 мин 1 л воды, взятой при 20°С . Какова должна быть длина нихромовой проволоки с сечением $0,5 \text{ мм}^2$, если печь работает под напряжением 120 В и её КПД 80% ?



5. ЭДС батарейки карманного фонаря $\varepsilon = 4,5$ В, её внутреннее сопротивление $r = 3$ Ом. Сколько таких батареек нужно подсоединить последовательно, чтобы питать лампу, рассчитанную на напряжение $U = 220$ В и мощность $P = 60$ Вт?
6. Сила тока в проводнике меняется по закону $I = 8 + 7t$, где I выражено в Амперах и t — в секундах. Какой заряд проходит через поперечное сечение проводника за 5 с?
7. Какой истинный ток на участке цепи, если амперметр показывает 2А, а сопротивления шунта в 5 раз меньше сопротивления амперметра?
8. ЭДС батареи равна 24 В. Наибольшая сила тока, которую может дать батарея, $I_{\max} = 10$ А. Определить максимальную мощность $P_{\max}$, которая может выделяться во внешней цепи.

Рекомендуемая литература

1. Трофимова Т. И. Основы физики. В 5 кн. Кн.1. Механика: учебное пособие для вузов/Т. И. Трофимова. — М.: Высшая школа, 2007 . — 220 с.
2. Трофимова Т. И. Основы физики. В 5 кн. Кн.2. Молекулярная физика. Термодинамика /Т. И. Трофимова. — М.: Высшая школа, 2007 . — 180 с.
3. Трофимова Т. И. Основы физики. В 5 кн. Кн.3. Электродинамика: учебное пособие /Т. И. Трофимова. — М.: Высшая школа, 2007. — 270 с.
4. Трофимова, Т. И. Руководство к решению задач по физике: учебное пособие для бакалавров вузов по техническим направлениям и специальностям /Т. И. Трофимова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Юрайт, 2014. — 265 с.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики с примерами решения задач. В 2-х т.: учебник /Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. — М.: КноРус, 2015.
6. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики для студентов технических вузов. Изд. доп., перераб. - 327 с. СПб: СпецЛит, 2002.
7. Чертов, А. Г. Задачник по физике: Учебное пособие для втузов /А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. — 7-е изд., перераб. и доп. — М: Физматлит, 2003 . — 640 с.