МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА”

Кафедра физики

И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, В. Г. РОДНЕНКОВ,
Л. М. БУЛАВКО

ФИЗИКА ДЛЯ ЭКОНОМИСТОВ

Часть 1

МЕХАНИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Гомель 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА"

Кафедра физики

И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, В. Г. РОДНЕНКОВ,
Л. М. БУЛАВКО

ФИЗИКА ДЛЯ ЭКОНОМИСТОВ

Часть 1

МЕХАНИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*Одобрено методической комиссией заочного факультета
в качестве учебно-методического пособия для
студентов-заочников специальности «Экономика
и организация производства (по направлениям)»*

Гомель 2013

УДК 531/534 (075.8)
ББК 22.3
Д29

Рецензент – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов* (УО «БелГУТ»).

Деликатная, И. О.
Д29 Физика для экономистов : учеб.-метод. пособие. В 2 ч. Ч. 1. Механика. Молекулярная физики. Электричество / И. О. Деликатная, В. Г. Родненков, Л. М. Булавко ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 77 с.
ISBN 978-985-554-178-4 (ч. 1)

Приведены общие методические указания, вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы, основная и дополнительная литература, сведения из теории, примеры решения задач, задачи для контрольных работ и справочные таблицы по разделам «Механика. Молекулярная физика. Электричество» программы курса физики для экономических специальностей технических вузов.

Предназначено для методического обеспечения самостоятельной работы по физике студентов экономических специальностей заочного факультета БелГУТа.

УДК 531/534 (075.8)
ББК 22.3

ISBN 978-985-554-178-4 (ч.1)
ISBN 978-985-554-177-7

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Дисциплина «Физика» делится на шесть разделов. В соответствии с этим учебный материал разделен на две части, которые включают в себя по три раздела курса. Изучение курса физики сопровождается выполнением двух контрольных работ из восьми задач. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем в конце соответствующей экзаменационной сессии.

Процесс изучения курса физики студентом заочной формы обучения состоит из следующих основных этапов: самостоятельное изучение физики по учебным пособиям, решение задач, выполнение контрольных работ и их защита преподавателю, выполнение лабораторных работ, сдача зачетов и экзаменов.

Самостоятельная работа по учебным пособиям

Этот вид занятий является главным в учебной работе студента заочной формы обучения. При этом необходимо руководствоваться следующим.

- Курс физики следует изучать систематически в течение всего учебного процесса. Изучение курса в сжатые сроки перед экзаменом не дает глубоких и прочных знаний.
- Избрав какое-нибудь учебное пособие в качестве основного, студент должен придерживаться его при изучении всего курса или, по крайней мере, целого раздела. Замена одного учебного пособия другим в процессе изучения ведет к утрате логической связи между отдельными вопросами. Если же основное пособие не дает полного ответа на отдельные вопросы программы, необходимо обратиться и к другим учебным пособиям.
- Работа над учебным пособием сопровождается составлением конспекта, в котором записываются формулировки законов и выражающие их формулы, определения физических величин и единиц их измерения, выполняется чертеж и решаются типовые задачи.

• Изучая курс физики, студент встречается с большим количеством единиц измерения, которые объединяются в Международную систему единиц (СИ). Студент должен помнить, что без основательного знания системы единиц, без умения пользоваться ими при решении физических задач, невозможно усвоить курс физики и тем более применять физические знания на практике.

• Всю работу по овладению курса физики студент должен подвергать систематическому самоконтролю с помощью вопросов, которые приводятся в пособии при изучении каждого раздела.

Студент не должен ограничиваться только запоминанием физических формул. Он должен осмыслить их и уметь самостоятельно вывести.

Решение задач

Необходимым условием успешного изучения курса общей физики является систематическое решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить в памяти студента формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

При решении задач необходимо:

• выбрать основные законы и формулы, которые используются при решении задачи, вспомнить словесную формулировку этих законов, разъяснить буквенные обозначения, употребляемые при написании формул. При использовании для решения задач формулы, которая является частным случаем и не выражает физический закон или не является определением какой-нибудь физической величины, эту формулу следует вывести, сопровождая решение краткими исчерпывающими пояснениями;

• все величины, входящие в условие задачи, выразить в единицах СИ. Проверить размерность искомой величины. Для этого подставить в правую часть полученной формулы вместо обозначений величин наименования их единиц и проверить, получается ли в результате единица искомой величины. Верно полученная рабочая формула должна давать правильную размерность искомой величины;

• в окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, подставить числовые значения, выраженные в единицах одной системы (СИ). Пренебрежение этим правилом приводит к неверному результату;

• произвести вычисления величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений, при необходимости – представлять результат в виде степенного числа. Записать в ответе числовое значение и размерность единицы измерения искомой величины в СИ;

• оценить правдоподобность полученного результата.

Физические задачи весьма разнообразны, и дать единую схему их решения невозможно. Однако, как правило, *физические задачи следует решать в общем виде, т. е. в буквенных выражениях*, не производя вычисления промежуточных величин. *Числовые значения подставляются только в окончательную рабочую формулу, выражающую искомую величину.* Умение решать задачи приобретается длительными и систематическими упражнениями.

Требования к оформлению контрольных работ

Выполнение контрольных работ студентом и их рецензирование преследует две цели: во-первых, таким путем осуществляется контроль за самостоятельной работой студента; во-вторых, проверяется усвоение студентом соответствующего материала с целью оказать, при необходимости, ему помощь по вопросам, которые оказались слабо усвоены или не поняты студентом.

По каждому разделу курса общей физики студент-заочник приступает к выполнению контрольных работ только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с приемами решения задач, приведенных в данном пособии по каждому разделу курса. При этом необходимо руководствоваться следующим.

• Контрольные работы № 1 и 2 *выполняются каждая в отдельной школьной тетради* и только по условиям задач данного пособия. Замена какой-либо контрольной работы другой, взятой из аналогичного пособия, не допускается.

• На лицевой стороне контрольной работы приводятся сведения по следующему образцу:

Кафедра физики **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № __ ПО ФИЗИКЕ** (задачи №   ) студента __ курса (группа ______) Иванова Ивана Петровича Учебный шифр № ______________ Домашний адрес: 246028, г. Гомель, ул. Кожара, д. 27, кв. 15

- Выполнять контрольные работы следует чернилами или шариковой ручкой. *Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы.* Условие задачи переписывается полностью, без сокращений. Для замечаний рецензента на страницах тетради оставляются поля.
- Все решаемые задачи сопровождаются краткими, но исчерпывающими пояснениями, раскрывающими физический смысл употребляемых формул, и с обязательным выполнением основных правил решения задач.
- В конце каждой контрольной работы студент-заочник должен привести название учебника или учебного пособия, которым он пользовался, автора и год издания, чтобы рецензент в случае необходимости мог конкретно указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.
- Получив прорецензированную работу, студент обязан устранить недостатки, указанные рецензентом.
- Если при рецензировании контрольная работа получает пометку «Доработать», студент обязан послать ее на повторное рецензирование, включив в нее дополнительные решения тех задач, в которых были допущены ошибки. Работа над ошибками выполняется в той же тетради (в конце контрольной работы).
- Студент является на экзаменационную сессию, получает на кафедре прорецензированные работы и по расписанию деканата защищает их перед преподавателем. Студент должен быть готов при защите контрольной работы дать пояснения по существу решения входящих в нее задач. Защищенные контрольные работы остаются у экзаменатора.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РАЗДЕЛАМ ПРОГРАММЫ

Физические основы механики

Кинематика и динамика поступательного и вращательного движений. Основные кинематические характеристики движения частиц и тел. Скорость и ускорение. Кинематика вращательного движения твердого тела. Угловая скорость и угловое ускорение. Масса и импульс. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчета. Второй закон Ньютона. Сила. Третий закон Ньютона. Момент инерции. Момент силы. Момент импульса. Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа и мощность при вращении твердого тела.

Силовые поля. Движение относительно неинерциальных систем отсчета. Законы сохранения в механике. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции. Закон сохранения импульса. Закон сохранения момента импульса твердого тела. Работа. Кинетическая энергия. Мощность. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике.

Молекулярная физика и термодинамика

Основы молекулярной физики. Статистический и термодинамический методы. Уравнение состояния идеального газа. Молекулярно-кинетическая теория.

Статистические распределения. Распределение Максвелла. Средняя кинетическая энергия частицы. Скорости теплового движения частиц. Диффузия газа. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.

Основы термодинамики. Первое начало термодинамики. Степени свободы молекул. Распределение энергии по степеням свободы молекул. Внутренняя энергия. Второе начало термодинамики. Тепловые машины и холодильники. Цикл Карно.

Электричество

Электрическое поле в вакууме. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь. Электрическая теорема Гаусса и ее применение к расчету полей. Работа электростатического поля. Потенциал поля и его связь с напряженностью. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля.

Диэлектрики и проводники в электрическом поле. Типы диэлектриков и виды поляризации. Сегнетоэлектрики. Проводники в электрическом поле. Электроемкость. Конденсаторы. Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия электрического поля и ее объемная плотность.

Постоянный электрический ток в металлах, электролитах, газах и вакууме. Электрические цепи. Постоянный электрический ток. Условия существования тока. Законы Ома и Джоуля-Ленца. Правила Кирхгофа. Работа и мощность тока. Термоэлектронная эмиссия. Ионизация газов. Плазма и ее свойства.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 560 с.

2 **Детлаф, А. А**. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989. – 421 с.

3 **Савельев, И. В.** Курс общей физики. В 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989.

4 **Наркевич, И. И.** Физика для втузов. В 2 т. / И. И. Наркевич и [др.]. – Мн. : Вышэйшая школа, 1994.

Дополнительная

1 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по физике / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 352 с.

2 **Чертов, А. Г**. Физические величины / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 315 с.

3 **Трофимова, Т.И.** Сборник задач по курсу физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 2003. – 303 с.

4 **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1990. – 624 с.

5 **Савельев, И. В.** Сборник вопросов и задач по общей физики / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 288 с.

6 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физики / И. Е. Иродов. – М. : Наука, 1988. – 416 с.

7 **Сена, Л. И.** Единицы физических величин и их размерности / Л. И. Сена. – М. : Наука, 1988. – 432 с.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ (СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ)

Кинематика материальной точки

1 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)

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

где t – время.

2 Средняя скорость движения

$$< \vec{v} > = \Delta v / \Delta t,$$

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

$$< v_n > = \Delta s / \Delta t,$$

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 $v_x = \partial x / \partial t$; $v_y = \partial y / \partial t$; $v_z = \partial z / \partial t$ – проекции скорости $\vec{v}$ на оси координат.

Абсолютная величина скорости

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

3 Ускорение

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

где $a_x = \partial x / \partial t$; $a_y = \partial y / \partial t$; $a_z = \partial z / \partial t$ – 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 $\vec{a}_\tau$ 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.

4 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 –

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \qquad v_x = v_{0x} + a_x t, \qquad a_x = \text{const}.$$

5 При вращательном движении положение твердого тела определяется углом поворота (угловым перемещением) φ. Кинематическое уравнение вращательного движения в общем виде

$$\varphi = f(t).$$

6 Средняя угловая скорость

$$< \omega > = \Delta\varphi / \Delta t,$$

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

Мгновенная угловая скорость

$$\omega = d\varphi / dt.$$

7 Угловое ускорение

$$\varepsilon = d\omega / dt.$$

8 Кинематическое уравнение вращения тела:

а) при равномерном вращении (ω = const, ε = 0) –

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t,$$

где φ_0 – начальное угловое перемещение; t – время;

б) при равнопеременном вращении (ε = const) –

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \varepsilon t^2/2, \qquad \omega = \omega_0 + \varepsilon t,$$

где ω_0 – начальная угловая скорость; t – время;

в) частота вращения

$$n = N/t \quad \text{èëè} \quad n = 1/T,$$

где N – число оборотов, совершаемых телом за время t; T – период вращения (время одного полного оборота).

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

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

$$s = \varphi R\,;$$

б) линейная скорость точки

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

в) тангенциальное ускорение точки

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

г) нормальное ускорение точки

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

Динамика материальной точки и тела, движущихся поступательно

10 Уравнение динамики материальной точки (второй закон Ньютона) в векторной форме:

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

где $\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$ – геометрическая сумма сил, действующих на материальную точку; m – масса; $\vec{a}$ – ускорение; $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс.

В координатной (скалярной) форме

$$ma_x = \sum F_{x_i}, \qquad ma_y = \sum F_{y_i}, \qquad ma_z = \sum F_{z_i}\,.$$

11 Сила упругости

$$F_{\text{упр}} = -kx\,,$$

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

12 Сила гравитационного взаимодействия

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

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

13 Сила трения

$$F_{\text{тр}} = \mu N ,$$

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

14 Координаты центра масс системы материальных точек:

$$x_{\text{c}} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \qquad y_{\text{c}} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \qquad z_{\text{c}} = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} ,$$

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

15 Закон сохранения импульса

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

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

16 Работа силы:

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

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

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

17 Мощность:

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

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

18 Кинетическая энергия материальной точки (или тела, движущегося поступательно)

$$T = \left(mv^2/2\right) \qquad \text{èëè} \qquad T = \left(p^2/2m\right).$$

19 Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$\text{Ï} = kx^2/2 .$$

20 Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

$$\text{Ï} = -G\frac{m_1 m_2}{r} .$$

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

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

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 $h << R_з$ ($R_з$ – радиус Земли).

21 Закон сохранения энергии в механике (для замкнутых консервативных систем)

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

Динамика вращательного движения твердого тела

22 Момент инерции материальной точки

$$I = mr^2,$$

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

Момент инерции твердого тела

$$I = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i r_i^2 \ \text{èëè â èíòåãðàëüíîé ôîðìå} \quad I = \int r^2 \mathrm{d}m\ ,$$

где r_i – расстояние элемента массы Δm_i от оси вращения.

Теорема Штейнера. Момент инерции тела относительно произвольной оси

$$I = I_0 + ma^2\ ,$$

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

23 Момент силы $\vec{F}$, 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).

24 Момент импульса вращающегося тела относительно оси

$$L = I\,\omega\ ,$$

где ω – угловая скорость вращения тела; I – момент инерции тела.

25 Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси

$$M = \frac{dL}{dt} \quad \text{èëè} \quad M = \frac{d(I\omega)}{dt}.$$

Если I = const, то $M = I\varepsilon$,
где ε – угловое ускорение тела.

26 Закон сохранения момента импульса:

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

где L_i – момент импульса тела с номером i, входящего в состав замкнутой системы тел.

Закон сохранения момента импульса для двух взаимодействующих тел:

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I_1'\omega_1' + I_2'\omega_2',$$

где I_1, I_2, ω_1, ω_2 – момент инерции и угловые скорости тел до взаимодействия; I_1', I_2', ω_1', ω_2' – те же величины после взаимодействия.

27 Работа постоянного момента силы M, действующего на вращающееся тело,

$$A = M\varphi,$$

где φ – угол поворота тела.

28 Мгновенная мощность, развиваемая при вращении тела,

$$N = M\omega.$$

29 Кинетическая энергия вращающегося тела

$$T = I\omega^2/2.$$

30 Кинетическая энергия тела, катящегося по плоскости без скольжения,

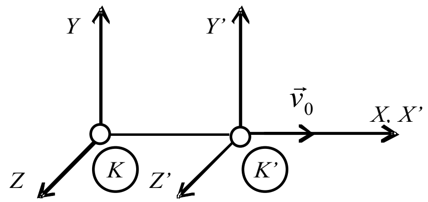
$$T = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$$

где $mv^2/2$ – кинетическая энергия поступательного движения тела; v – скорость центра инерции тела; $I\omega^2/2$ – кинетическая энергия вращательного движения тела вокруг оси, проходящей через центр инерции.

Релятивистская механика

В задачах данного пособия по релятивистской механике считается, что оси Y, Y' и Z, Z' сонаправлены, а относительная скорость v_0 "штрихованной" системы коодинат K направлена вдоль общей оси XX' (рисунок 1).

Рисунок 1



31 Релятивистское (лоренцево) сокращение длины стержня

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

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

32 Релятивистское замедление хода часов

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

где Δt_0 – промежуток времени между двумя событиями в одной и той же точке системы K' (собственное время движущихся часов); Δt – промежуток времени между двумя событиями, измеренный по часам системы K.

33 Релятивистское сложение скоростей:

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

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

34 Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(v / c\right)^2}},$$

где m_0 – масса покоя.

35 Релятивистский импульс

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(v / c\right)^2}}.$$

36 Полная энергия релятивистской частицы

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

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

37 Связь полной энергии с импульсом релятивистской частицы

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

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

1 Количество однородного вещества (в молях)

$$\upsilon = \frac{N}{N_A} \quad \text{èëè} \quad \upsilon = \frac{m}{\mu},$$

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

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

$$\upsilon = \upsilon_1 + \upsilon_2 + \ldots + \upsilon_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \ldots + \frac{N_n}{N_A} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} +$$

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

3 Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

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

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

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

а) Закон Бойля-Мариотта (изотермический процесс – T = const, m = const):

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

или для двух состояний газа:

$$p_1V_1 = p_2V_2;$$

б) закон Гей-Люссака (изобарный процесс – p = const, m = const):

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

в) закон Шарля (изохорный процесс – V = const, m = const):

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

г) объединённый газовый закон (m = const):

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2},$$

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.

5 Закон Дальтона, определяющий давление смеси n идеальных газов,

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

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.

6 Молярная масса смеси n газов

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \ldots + m_n}{\upsilon_1 + \upsilon_2 + \ldots + \upsilon_n},$$

где m_i и υ_i – масса и количество вещества i-го компонента смеси.

7 Концентрация молекул

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

где N – число молекул в системе; V – объем системы; ρ – плотность вещества; N_A – число Авогадро.

Формула справедлива для любого состояния вещества.

8 Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT,$$

где k – постоянная Больцмана.

9 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

$$p = \frac{1}{3} n m_0 < v_{\text{êâ}} >^2 = \frac{2}{3} n < \varepsilon > \quad \text{èëè} \quad pV = \frac{1}{3} m < v_{\text{êâ}} >^2 = \frac{2}{3} E$$

,

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

10 Закон Максвелла распределения молекул идеального газа по скоростям

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

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

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

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

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

12 Распределение молекул по энергиям. Число молекул, энергии которых заключены в интервале от ε до ε + dε,

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

где f(ε) – функция распределения по энергиям.

13 Скорость молекул:

наиболее вероятная – $$v_в = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}};$$

средняя квадратичная – $$< v_{êâ} > = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}};$$

средняя арифметическая – $$< v > = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}},$$

где m_0 – масса молекулы.

14 Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$< \varepsilon > = \frac{3}{2}kT.$$

15 Средняя полная кинетическая энергия молекулы

$$< \varepsilon > = \frac{i}{2}kT,$$

где i – число степеней свободы молекулы.

16 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.

17 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, в которых $U = 0$, U – их потенциальная энергия.

18 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; $<v>$ – средняя арифметическая скорость молекулы.

19. Средняя длина свободного пробега молекул газа

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

20 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.

21 Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \rho < v >< l >,$$

где ρ – плотность газа (жидкости).

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

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

23 Закон теплопроводности Фурье

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

где ΔQ – теплота, прошедшая посредством теплопроводности через площадку S за время Δt; $dT/\mathrm{d}x$ – градиент температуры; λ – теплопроводность, для газов

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho < v >< l >;$$

c_v – удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме; ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ и $\langle l \rangle$ – средняя арифметическая скорость и средняя длина свободного пробега молекул.

24 Закон диффузии Фика

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

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

$$D = \frac{1}{3} < v >< l > .$$

Основы термодинамики

25 Молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме и постоянном давлении соответственно

$$C_{V\mu} = \frac{i}{2} R, \qquad C_{p\mu} = \frac{i+2}{2} R,$$

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

26 Связь между удельной (c) и молярной (C_μ) теплоёмкостями

$$C_\mu = c\mu,$$

где μ – молярная масса.

27 Уравнение Майера

$$C_{p\mu} - C_{V\mu} = R.$$

28 Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} T.$$

29 Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^{\gamma} = \mathrm{const},\ TV^{\gamma-1} = \mathrm{const},\ T^{\gamma}p^{1-\gamma} = \mathrm{const},$$

где γ – показатель адиабаты,

$$\gamma = \frac{C_{p\mu}}{C_{V\mu}} = \frac{i+2}{i}.$$

30 Уравнение политропы

$$pV^{\gamma} = \mathrm{const},$$

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

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

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V,$$

где V_1 и V_2 – начальный и конечный объемы газа.

Работа при изобарическом процессе (p = const)

$$A = p\,(V_2 - V_1),$$

– изотермическом (T = const) – $A = \dfrac{m}{\mu} RT \ln \dfrac{V_2}{V_1}$,

– адиабатном (Q = const) –

$$A = \frac{m}{\mu} C_{V\mu}(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{\gamma-1}\frac{m}{\mu}\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right] = \frac{p_1V_1}{\gamma-1}\left[1 - \left(\frac{V}{V}\right.\right.$$

,

– политропном (C = const) – $A = \dfrac{m}{\mu}\dfrac{RT_1}{n-1}\left(1 - \dfrac{T_2}{T_1}\right)$,

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

32 Первое начало термодинамики

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

где Q – количество теплоты, сообщённое газу; ΔU – изменение его внутренней энергии; A – работа, совершённая газом против внешних сил.

Первое начало термодинамики при изобарическом процессе:

$$Q = \Delta U + A = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_{p\mu} \Delta T,$$

– изохорном ($A = 0$) –

$$Q = \Delta U = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} \Delta T,$$

– изотермическом ($\Delta U = 0$) –

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

– адиабатическом ($Q = 0$) –

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

33 Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла)

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

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

КПД цикла Карно

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

где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

34 Холодильный коэффициент машины, работающей по обратному циклу Карно,

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

где $Q_{отв}$ – 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).

35 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

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

36 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:

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

Внутренняя энергия реального газа

$$U = \frac{m}{\mu}\left(C_{V\mu}T - \frac{a}{V_\mu}\right).$$

36 Коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = \frac{F}{l},$$

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

37 При изотермическом увеличении площади поверхности плёнки жидкости на ΔS совершается работа

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

38 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

$$\Delta p = 2\alpha/R .$$

39 Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке

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

где θ – краевой угол смачивания; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; r – радиус капиллярной трубки.

Высота поднятия жидкости в зазоре между двумя близкими и параллельными плоскостями

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

где d – расстояние между плоскостями.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Электростатическое поле

1 Закон Кулона (для однородной изотропной среды):

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где F – сила взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2; ε – диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; r – расстояние между зарядами.

2 Закон сохранения электрического заряда

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

где $\sum_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, входящих в электрически изолированную систему; n – число зарядов.

3 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.

4 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

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

где интегрирование ведётся по всей поверхности.

5 Теорема Остроградского–Гаусса для электростатического поля в вакууме. Поток вектора напряжённости через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую электрические заряды q_1, q_2, ... q_n,

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n} q_i ,$$

где $\sum_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, заключённых внутри этой замкнутой поверхности; n – число зарядов.

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

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^2}.$$

7 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 ($r = R$) –

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{R^2};$$

в) вне сферы ($r > R$) –

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^2}.$$

8 Принцип суперпозиции (наложения) электрических полей, согласно которому напряжённость результирующего поля, созданного двумя и более источниками поля, равна векторной сумме напряжённостей складываемых полей:

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

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 $\vec{E}_2$.

9 Поверхностная плотность заряда

$$\sigma = \frac{dq}{dS}.$$

10 Напряжённость поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью,

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}.$$

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

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}.$$

12 Линейная плотность τ заряда есть величина, равная отношению заряда, распределённого по нити, к длине нити (цилиндра):

$$\tau = \frac{dq}{dl}.$$

13 Напряжённость поля, создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или цилиндром) на расстоянии r от оси,

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{\tau}{r}.$$

14 Циркуляция вектора напряжённости электрического поля есть величина, численно равная работе по перемещению единичного точечного положительного заряда вдоль любого замкнутого контура. Циркуляция выражается интегралом и в случае электростатического поля равна нулю:

$$\oint_L \vec{E}dl = \oint_L E_L dl,$$

где E_L – проекция вектора напряжённости в данной точке контура на направление касательной к контуру в той же точке.

15 Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению потенциальной энергии точечного положительного заряда, помещённого 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.

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

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r}.$$

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

а) внутри сферы ($r < R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{R};$$

б) на поверхности сферы ($r = R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{R};$$

в) вне сферы ($r > R$) –

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r}.$$

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

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

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

19 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.

20 Связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля:

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

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

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

22 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 этими поверхностями вдоль силовой линии.

23 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.

24 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.

25 Диполь есть 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

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

26 Напряжённость и потенциал поля диполя в точке, лежащей на оси диполя,

$$E = \frac{p}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r^3}, \qquad \varphi = \frac{p}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2},$$

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

27 Напряжённость и потенциал поля диполя в точке, лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины,

$$E = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^3}, \qquad \varphi = 0.$$

28 Механический момент, действующий на диполь в однородном электрическом поле,

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

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

29 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.

30 Связь поляризованности с напряжённостью поля в диэлектрике

$$P = \chi \varepsilon_0 E,$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

31 Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью

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

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

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

33 Электрическое смещение связано с напряжённостью поля соотношением

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

34 Теорема Остроградского–Гаусса для электростатического поля в веществе. Поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую заряды $q_1, q_2, \ldots q_n$,

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

где D_n – проекция вектора электрического смещения на направление нормали к элементу поверхности; $\sum_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма свободных зарядов, заключённых внутри замкнутой поверхности; n – число зарядов.

35 Электрическая ёмкость уединённого проводника или конденсатора

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

где Δq – заряд, сообщённый проводнику (конденсатору); $\Delta\varphi$ – изменение потенциала, вызванное этим зарядом.

36 Емкость уединённой проводящей сферы радиусом R, находящейся в среде с диэлектрической проницаемостью ε,

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

37 Электрическая ёмкость плоского конденсатора

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

где S – площадь пластины; d – расстояние между пластинами.

38 Электрическая ёмкость цилиндрического конденсатора

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

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

39 Электрическая ёмкость 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.

40 Емкость батареи конденсаторов при последовательном соединении:

а) в общем случае – $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$

б) в случае двух конденсаторов – $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$.

41 Емкость батареи конденсаторов при параллельном соединении

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$$

42 Энергия заряженного конденсатора

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

43 Энергия электростатического поля плоского конденсатора

$$W = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2}Sd = \frac{\varepsilon_0\varepsilon SU^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2}V$$

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

44 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.

Постоянный электрический ток

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

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

46 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.

47 Плотность тока в проводнике

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

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

48 Закон Ома:

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

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

б) неоднородного участка цепи –

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

в) 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.

49. 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.

50 Сопротивление однородного проводника

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

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

51 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.

52 Сопротивление проводников при последовательном и параллельном соединениях

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i \quad \text{и} \quad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i},$$

где n – число проводников; R_i – сопротивление i-го проводника.

53 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.

54 Работа, совершаемая электростатическим полем и сторонними силами в участке цепи постоянного тока за время t:

$$A = IUt .$$

55 Мощность тока

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

56 Закон Джоуля–Ленца определяется соотношением:

$$Q = I^2 Rt = UIt = \frac{U^2}{R} t ,$$

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.

57 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.

58 Закон Видемана–Франца:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = 3\frac{k^2}{e^2}T,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; γ – удельная проводимость материала проводника; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; T – термодинамическая температура.

Электрический ток в газах

59 Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

$$j = qn\left(u_+ + u_-\right)E,$$

где q – заряд иона; n – концентрация ионов; u_+, u_- – подвижности положительных и отрицательных ионов.

60 Плотность тока насыщения в газе между плоскими электродами

$$j_{\text{i}} = q\Delta nd,$$

где q – заряд иона; Δn – число пар ионов, создаваемых ионизатором в единицу времени (t) в единице объёма (V) газа, $\Delta n = N/(Vt)$; d – расстояние между электродами.

61 Плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии (удельная эмиссия) определяется формулой Ричардсона–Дэшмана:

$$j_{\text{i}} = BT^2\exp\left(-\frac{A}{kT}\right),$$

где B – эмиссионная постоянная; A – работа выхода электрона из металла; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Примеры решения задач

Пример 1. Зависимость пройденного телом пути от времени вдоль оси X имеет вид $x = A + Bt^2 + Ct^3$, где $A = 5$ м, $B = 2$ м/с^2, $C = 1$ м/с^3. Найти координату x_1, скорость v_1 и ускорение a_1 в момент времени $t_1 = 2$ с.

Решение. Координату x_1 найдем, подставив в уравнение движения числовые значения коэффициентов A, B, C и времени $t_1 = 2$ с:

$$x_1 = (5 + 2 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3)\ \text{м} = 21\ \text{м}.$$

Мгновенная скорость равна первой производной от координаты по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = 2Bt + 3Ct^2 .$$

Ускорение точки найдем как первую производную от скорости по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = 2B + 6Ct .$$

В момент времени $t_1 = 2$ с

$v_1 = (2 \cdot 2 \cdot 2 + 3 \cdot 1 \cdot 2^2)$ м/с = 20 м/с, $a_1 = 2 \cdot 2 + 6 \cdot 1 \cdot 2 = 16$ м/с^2.

Размерности искомых величин очевидны.

Пример 2. Камень брошен под углом $\alpha = 30°$ к горизонту. Определить наибольшую высоту подъема и дальность полета, если начальная скорость камня $v_0 = 10$ м/с.

Д а н о:

$\alpha = 30°$
$v_0 = 10$ м/с
x_{max} – ?
y_{max} – ?

Решение. Пренебрегая сопротивлением воздуха, можно считать, что ускорение камня в рассматриваемом движении постоянно и равно ускорению свободного падения $(\vec{a} = \vec{g})$. Так как векторы ускорения $\vec{a}$ и начальной скорости $\vec{v}_0$ направлены под углом не равным нулю, то движение камня криволинейное, траектория его лежит в плоскости $X0Y$. Это криволинейное движение как результат сложения двух прямолинейных движений: равномерного вдоль оси $0X$ со скоростью $v_x = v_{0x} = v_0 \cos \alpha$ и равноускоренного вдоль оси $0Y$.

В точке бросания составляющие скорости

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \qquad v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

В произвольный момент времени t скорости движение камня

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos \alpha , \quad v_y = v_{0y} + a_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

В наивысшей точке траектории (в момент времени t_1) $v_{y1} = 0$, тогда

$$v_0 \sin \alpha - gt_1 = 0 , \quad t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} .$$

Наибольшую высоту подъема найдем из уравнения движения камня по оси $0Y$:

$$y_{max} = y_1;\ y_1 = v_{0y}t_1 - \frac{gt_1^2}{2} = \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g}.$$

Время подъема камня на наибольшую высоту равно времени падения на землю. Тогда полное время полета

$$t_{пол} = 2t_1 = \frac{2v_0\sin\alpha}{g}.$$

Наибольшая дальность полета

$$x_{max} = v_x t_{пол} = v_0\cos\alpha\frac{2v_0\sin\alpha}{g} = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha.$$

Подставив числовые значения, получим

$$y_{max} = \frac{10^2\cdot(\sin 30^\circ)^2}{2\cdot 9{,}8} = 0{,}4 \text{ м},\quad x_{max} = \left(\frac{10^2}{9{,}8}\sin 60^\circ\right)\text{м} = 8{,}8 \text{ м}.$$

Анализ размерности искомых величин:

$$[x_{max}] = \frac{(\text{м/с})^2}{\text{м/с}^2} = \text{м},\quad [y_{max}] = \frac{(\text{м/с})^2}{\text{м/с}^2} = \text{м}.$$

Пример 3. Маховик, вращающийся с постоянной частотой $n_0 = 8$ с$^{-1}$, при торможении начал вращаться равнозамедленно. Когда торможение прекратилось, вращение маховика стало снова равномерным, но уже с частотой $n = 5$ с$^{-1}$. Определить угловое ускорение ε маховика, если за время равнозамедленного вращения маховик сделал $N = 30$ оборотов.

Д а н о:

$n_0 = 8$ с$^{-1}$
$n = 5$ с$^{-1}$
$N = 30$
ε – ?

Решение. Угловое ускорение маховика связано с начальной ω_0 и конечной ω угловыми скоростями соотношением $\omega^2 - \omega_0^2 = 2\varepsilon\varphi$, откуда

$$\varepsilon = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varphi}.$$

Но так как $\varphi = 2\pi N$, $\omega = 2\pi n$, то

$$\varepsilon = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varphi} = \frac{\pi(n^2 - n_0^2)}{N}.$$

Подставив числовые значения, найдем

$$\varepsilon = \frac{3{,}14(5^2 - 8^2)}{30} = -4{,}08\ \frac{1}{\text{ñ}^2}.$$

Знак минус углового ускорения указывает на то, что маховик вращался замедленно.

Анализ размерности искомых величин:

$$[\varepsilon] = \left(\frac{1}{\text{ñ}}\right)^2 = \frac{1}{\text{ñ}^2}.$$

Пример 4. Два шара массами $m_1 = 5$ кг и $m_2 = 3$ кг движутся навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 4$ м/с и $v_2 = 2$ м/с. Определить: 1) скорость шаров после удара; 2) кинетические энергии шаров до и после удара. Удар считать прямым, неупругим.

Д а н о:

$m_1 = 5$ кг
$m_2 = 3$ кг
$v_1 = 4$ м/с
$v_2 = 2$ м/с
u – ?
T_1 – ?
T_2 – ?

Решение. Неупругие шары не восстанавливают после удара свою первоначальную форму. Следовательно, не возникают силы, отталкивающие шары друг от друга, и шары после удара будут двигаться совместно с одной и той же скоростью u. Определим эту скорость по закону сохранения импульса. Так как шары движутся по одной прямой, то этот закон можно записать в скалярной форме:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2)\, u,$$

откуда

$$u = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Направление скорости первого шара принято за положительное.

Кинетические энергии шаров до и после взаимодействия определим по формулам

$$T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}, \quad T_2 = \frac{(m_1 + m_2)u^2}{2}.$$

Подставим числовые значения и сделаем вычисления:

$$u = \frac{5 \cdot 4 - 3 \cdot 2}{5 + 3} = 1{,}75\ \text{ì/ñ}\ , \quad T_1 = \frac{5 \cdot 4^2}{2} + \frac{3 \cdot 2^2}{2} = 46\ \text{Äæ},$$

$$T_2 = \frac{(5 + 3) \cdot \left(1{,}75\right)^2}{2} = 12{,}3\ \text{Äæ}.$$

Размерность искомых величин очевидна.

Пример 5. Два сосуда наполнены одним и тем же газом под давлением $5 \cdot 10^6$ Па и $8 \cdot 10^6$ Па и массой 0,2 и 0,3 кг соответственно. Сосуды соединяют трубкой, объемом которой можно пренебречь по сравнению с объемами сосудов. Найти установившееся давление в сосудах, если температура газа в них была одинаковая и после установления искомого давления увеличилась в 1,4 раза.

Д а н о:

$p_1 = 5 \cdot 10^6$ Па
$p_2 = 8 \cdot 10^6$ Па
$m_1 = 0{,}2$ кг
$m_2 = 0{,}3$ кг
$T_1 = 1{,}4T$
p_3 – ?

Решение. Пусть в первом сосуде газ массой m_1 занимает объем V_1 под давлением p_1 при температуре T. Аналогично во втором сосуде газ массой m_2 занимает объем V_2, под давлением p_2 при температуре T. После соединения сосудов газ занял объем $V_1 + V_2$, его давление стало равным p_3, а температура $1{,}4T$. Запишем уравнение Клапейрона–Менделеева для каждого состояния газа.

Для первого сосуда

$$p_1 V_1 = \frac{m_1}{\mu} RT\ , \tag{1}$$

где μ – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная.

Для второго сосуда

$$p_2 V_2 = \frac{m_2}{\mu} RT\ . \tag{2}$$

После соединения сосудов

$$p_3(V_1 + V_2) = 1{,}4\frac{m_1 + m_2}{\mu}RT. \qquad (3)$$

Выражая из уравнений (1) и (2) неизвестные объемы V_1 и V_2 и подставляя их в уравнение (3), получим

$$p_3 = 1{,}4\frac{m_1 + m_2}{m_1 p_2 + m_2 p_1}p_1 p_2.$$

Проводя вычисления, находим:

$$p_3 = 1{,}4\frac{0{,}2 + 0{,}3}{0{,}2 \cdot 5 \cdot 10^6 + 0{,}3 \cdot 8 \cdot 10^6} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 10^6 = 8{,}23 \cdot 10^6 \text{ Ïà}.$$

Размерность искомых величин очевидна.

Пример 6. Найти среднюю кинетическую энергию $\langle\varepsilon_{вр}\rangle$ вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 286$ К, а также кинетическую энергию $W_{вр}$ вращательного движения всех молекул этого газа, если его масса $m = 4$ г.

Д а н о:

$m = 4\cdot10^{-3}$ кг
$T = 286$ К
$k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$
$\mu = 32\cdot10^{-3}$ кг·моль$^{-1}$
$N_A = 6{,}022\cdot10^{-23}$ моль$^{-1}$
$\langle\varepsilon_{вр}\rangle$ – ?
$W_{вр}$ – ?

Решение. В соответствии с законом о равномерном распределении энергии по степеням свободы известно, что на каждую степень свободы молекулы газа приходится одинаковая средняя энергия, выражаемая формулой $\langle\varepsilon\rangle = \frac{1}{2}kT$. Так как молекула кислорода является двухатомной, а следовательно, обладает двумя вращательными степенями свободы, то средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы кислорода

$$\langle\varepsilon_{вр}\rangle = 2\,\frac{1}{2}\,kT = kT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Подставим в эту формулу значения k и T. Произведя вычисления, получим

$$\langle\varepsilon_{вр}\rangle = 1{,}38\cdot10^{-23}\cdot286 = 3{,}95\cdot10^{-21} \text{ Дж}.$$

Средняя кинетическая энергия вращательного движения всех молекул газа выражается соотношением

$$W_{вр} = N\langle\varepsilon_{вр}\rangle. \qquad (1)$$

Если учесть, что число молекул системы $N = \dfrac{m}{\mu} N_А$, то равенство (1) можно записать в виде

$$W_{вр} = \frac{m}{\mu} N_А\langle\varepsilon_{вр}\rangle, \qquad (2)$$

где $N_А$ – число Авогадро; μ – молярная масса газа.

Подставим в формулу (2) значения величин и, произведя вычисления, найдем

$$W_{вр} = \frac{4\cdot 10^{-3}}{32\cdot 10^{-3}} \cdot 6{,}022 \cdot 10^{-23} \cdot 3{,}95 \cdot 10^{-21} = 297 \text{ Дж}.$$

Пример 7. Под поршнем в вертикальном цилиндре находится 3 кг кислорода. При сообщении ему некоторого количества теплоты его температура повысилась на 10 К. Найти увеличение внутренней энергии кислорода; работу, совершенную им при расширении; количество теплоты, сообщенное кислороду; его удельную теплоемкость, если поршень не закреплен и трение отсутствует.

Д а н о:
$m = 3$ кг
$\Delta T = 10$ К
$R = 8{,}31$ Дж/(моль·К)
$\mu = 32\cdot 10^{-3}$ кг·моль$^{-1}$
ΔU – ?
A – ?
ΔQ – ?
$c_р$ – ?

Решение. Если поршень не закреплен, то можно считать, что кислород расширяется при постоянном давлении.

Первый закон термодинамики для этого случая имеет вид

$$Q = \Delta U + A. \qquad (1)$$

Изменение внутренней энергии ΔU кислорода зависит для идеального газа только от разности температур, поэтому

$$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T,$$

где $i = 5$ – число степеней свободы для кислорода (двухатомный газ).

Работа, совершенная при изобарическом расширении,

$$A = p\,(V_2 - V_1).$$

Для определения работы воспользуемся уравнением Клапейрона-Менделеева, записанным для начального и конечного состояний кислорода:

$$pV_1 = \frac{m}{\mu}RT_1; \quad pV_2 = \frac{m}{\mu}RT_2 .$$

С их помощью выражение для работы можно записать так:

$$A = \frac{m}{\mu}R(T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu}R\Delta T .$$

Количество теплоты, сообщенное кислороду,

$$Q = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T + \frac{m}{\mu}R\Delta T = \frac{i+2}{2}\frac{m}{\mu}R\Delta T .$$

Удельную теплоемкость кислорода для изобарического процесса найдем из соотношения

$$Q = mc_{\text{p}}\Delta T.$$

Откуда

$$c_{\mathbf{p}} = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{i+2}{2}\frac{m}{\mu}\frac{R\Delta T}{m\Delta T} = \frac{i+2}{2}\frac{R}{\mu} .$$

Заметим, что для любого газа значение удельной теплоемкости зависит от вида процесса (в данном случае для изобарического). Для твердых и жидких тел это несущественно из-за незначительного коэффициента их объемного расширения.

Произведя вычисления, найдем:

$$\Delta U = \frac{5 \cdot 3}{2 \cdot 0{,}032} \cdot 8{,}31 \cdot 10 = 19{,}5 \text{ êÄæ};$$

$$A = \frac{3}{0{,}032} \cdot 8{,}31 \cdot 10 = 7{,}8 \text{ êÄæ};$$

$$Q = \frac{5+2}{2}\frac{3}{0{,}032} \cdot 8{,}31 \cdot 10 = 27{,}3 \text{ êÄæ};$$

$$c_{\text{p}} = \frac{5+2}{2} \cdot \frac{8{,}31}{0{,}032} = 909 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} .$$

Пример 8. Тепловая машина работает по обратимому циклу Карно. Температура теплоотдатчика $T_1 = 500$ К. Определить термический КПД η цикла и температуру T_2 теплоприемника тепловой машины, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от теплоотдатчика, машина совершает работу $A = 350$ Дж.

Д а н о:

$T_1 = 500$ К
$A = 350$ Дж
η – ?
T_2 – ?

Решение. Термический КПД тепловой машины показывает, какая доля теплоты, полученной от теплоотдатчика, превращается в механическую работу. Термический КПД выражается формулой

$$\eta = A/Q_1,$$

где A – работа, совершенная рабочим телом тепловой машины; Q_1 – теплота, полученная от теплоотдатчика.

Учитывая формулу для КПД цикла

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1,$$

можно определить температуру охладителя T_2:

$$T_2 = T_1(1 - \eta).$$

Произведем вычисления:

$$\eta = 350/1000 = 0{,}35; \qquad T_2 = 500(1 - 0{,}35)\text{ К} = 325\text{ К}.$$

Пример 9. Расстояние между двумя точечными зарядами 5 нКл и –4 нКл, расположенными в вакууме, равно 15 см. Определить напряженность поля, создаваемого этими зарядами в точке, удаленной от первого заряда на расстояние 10 см и от второго заряда на 7 см.

Д а н о:

$q_1 = 5$ нКл,
$q_2 = -4$ нКл,
$l = 15$ см,
$r_1 = 10$ см,
$r_2 = 7$ см,
$\varepsilon = 1$
E – ?

Решение. Согласно принципу суперпозиции $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ – напряженности электрических полей в рассматриваемой точке, которые создавались бы каждым из зарядов при отсутствии других (направления векторов показаны на рисунке 2).

Модули напряженностей электрических полей, создаваемых в вакууме точечными зарядами q_1 и q_2,

$$E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1^2}, \qquad E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2^2}. \tag{1}$$

Модуль вектора $\vec{E}$ найдем по формуле, которая следует из теоремы косинусов (для используемого при сложении векторов параллелограмма $\cos\alpha = -\cos\beta$):

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

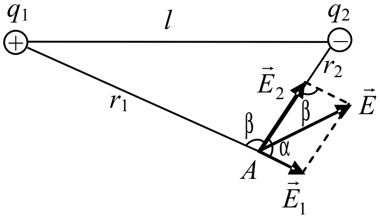


Рисунок 2

По теореме косинусов для треугольника q_1Aq_2

$$l^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\beta\,,$$

откуда следует, что $\cos\alpha = \dfrac{l^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_2}$.

Вычислим значение $\cos\alpha$:

$$\cos\alpha = \frac{(0{,}15)^2 - (0{,}1)^2 - (0{,}07)^2}{2\cdot 0{,}07\cdot 0{,}1} = 0{,}54.$$

Подставив значения E_1 и E_2 из формулы (1) в формулу (2), получим искомую напряженность:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + \frac{2|q_1||q_2|}{r_1^2r_2^2}\cos\alpha}\,.$$

Размерность вычисляемой физической величины по структуре формулы совпадает с аналогичной формулой для напряженности поля заряда, поэтому проверку единиц для нее можно не проводить.

Произведем вычисления, предварительно переведя все значения единиц в СИ:

$$E = 9\cdot 10^9\sqrt{\frac{\left(5\cdot 10^{-9}\right)^2}{0{,}1^4} + \frac{\left(4\cdot 10^{-9}\right)^2}{0{,}07^2} + \frac{2\cdot 5\cdot 10^{-9}\cdot 4\cdot 10^{-9}}{0{,}1^2\cdot 0{,}07^2}\cdot 0{,}54} = 10{,}5\ \text{êÂ/ì}.$$

Пример 10. Положительные заряды q_1 = 5 мкКл и q_2 = 10 нКл находятся в вакууме на расстоянии 2 м друг от друга. Определить работу, которую надо совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния 1 м.

Д а н о:
q_1 = 5 мкКл
q_2 = 10 нКл
$\varepsilon = 1$
l_1 = 2 м
l_2 = 1 м
A' – ?

Решение. Можно положить, что первый заряд q_1 остается неподвижным, а второй q_2 под действием внешних сил перемещается в поле, созданном зарядом q_1, приближаясь к нему с расстояния r_1= 2 м до r_2=1 м.

Работа A' внешней силы по перемещению заряда q из одной точки поля с потенциалом φ_1 в другую, потенциал которой φ_2, равна по абсолютной величине и противоположна по знаку работе A сил поля по перемещению заряда между теми же точками:

$$A' = -A.$$

Это следует из теоремы об изменении кинетической энергии тела: если кинетическая энергия не изменяется (предполагаем это), то полная работа всех сил равна нулю ($A' + A = 0$).

Работа A сил электрического поля по перемещению заряда выражается формулой

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Тогда работа A' внешних сил может быть записана в таком виде:

$$A' = q(\varphi_2 - \varphi_1). \qquad (1)$$

Потенциалы точек начала и конца пути выразятся формулами

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1}, \quad \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_2}.$$

Подставляя эти выражения в формулу (1) и учитывая, что для данного случая переносимый заряд $q = q_2$, получим

$$A' = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right).$$

Произведем проверку единиц:

$$[A'] = \frac{\text{ì}}{\text{Ô}}\frac{\text{Êë}^2}{\text{ì}} = \frac{\text{Â}}{\text{Êë}}\text{Êë}^2 = \frac{\text{Äæ}}{\text{Êë}}\text{Êë} = \text{Äæ}.$$

Выполним вычисления по полученной формуле:

$$A' = \frac{5\cdot 10^{-6}\cdot 10\cdot 10^{-9}}{4\cdot 3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}}\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{2}\right) = 0{,}22\cdot 10^{-3}\ \text{Äæ}.$$

Пример 11. Конденсатор емкостью C_1 = 4 мкФ заряжен до напряжения U_1 = 400 В, а конденсатор емкостью C_2 = 5 мкФ – до U_2 = 500 В. Определить напряжение между пластинами конденсатора после соединения их одноименно заряженными пластинами. Какое количество теплоты выделится в результате соединения конденсаторов?

Д а н о:

C_1 = 4 мкФ
C_2 = 5 мкФ
U_1 = 400 В
U_2 = 500 В
U – ?
Q – ?

Решение. Если конденсаторы соединены параллельно, то их общая емкость $C = C_1 + C_2$. В соответствии с законом сохранения заряда, заряд эквивалентного конденсатора $q = q_1 + q_2$,

где q_1 и q_2 – заряды конденсаторов до соединения.

Так как соединялись одноименно заряженные пластины, то искомое напряжение

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}.$$

Учитывая, что $q_1 = C_1 U_1$ и $q_2 = C_2 U_2$, получим

$$U = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2} = \frac{4\cdot 10^{-6}\cdot 400 + 5\cdot 10^{-6}\cdot 500}{4\cdot 10^{-6} + 5\cdot 10^{-6}} = 455{,}6\ \text{В}$$

.

Количество выделившейся теплоты определим, пользуясь законом сохранения и превращения энергии. Энергия конденсаторов до соединения

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2}.$$

После соединения –

$$W_2 = \frac{CU^2}{2} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2}\right)U^2.$$

Следовательно, искомое количество теплоты

$$Q = W_1 - W_2 = \frac{C_1U_1^2}{2} + \frac{C_2U_2^2}{2} - \left(\frac{C_1 + C_2}{2}\right)U^2.$$

Выполнив вычисления, получим:

$$Q = \frac{4\cdot 10^{-6}\cdot 400^2}{2} + \frac{5\cdot 10^{-6}\cdot 500^2}{2} - \left(\frac{4\cdot 10^{-6} + 5\cdot 10^{-6}}{2}\right)\cdot 455{,}6^{\,2} = 11\cdot 10^{-3}\ \text{Äæ}$$

Вычисляемые физические величины по структуре формул соответствуют известным соотношениям для напряжения и энергии заряженного конденсатора, поэтому проверка единиц не требуется.

Пример 12. Определить плотность электрического тока в алюминиевом проводнике (удельное сопротивление ρ = 32,1 нОм·м), если удельная тепловая мощность тока w = 2 Дж/(м^3· с).

Д а н о:

w = 2 Дж/(м^3· с)
ρ = 32,1 нОм·м
j – ?

*Решение***.** Согласно законам Джоуля–Ленца и Ома в дифференциальной форме

$$w = \sigma E^2 = \frac{E^2}{\rho}, \tag{1}$$

$$j = \sigma E = \frac{E}{\rho}, \tag{2}$$

где σ – удельная проводимость материала проводника; E – напряженность электрического поля в металле.

Из соотношения (2) получим, что $E = \rho j$. Подставив это выражение в уравнение (1), найдем искомую плотность тока:

$$j = \sqrt{\frac{w}{\rho}}\,.$$

Проверим единицы в конечной формуле:

$$[j] = \sqrt{\frac{\text{Äæ}}{\text{ì}^3\cdot\text{ñ}}\frac{1}{\text{Îì}\cdot\text{ì}}} = \sqrt{\frac{\text{Äæ}}{\text{ì}^4\cdot\text{ñ}}\frac{\text{À}}{\text{Â}}} = \frac{1}{\text{ì}^2}\sqrt{\frac{\text{Äæ}\cdot\text{À}}{\text{ñ}}\frac{\text{Êë}}{\text{Äæ}}} = \frac{1}{\text{ì}^2}\sqrt{\frac{\text{À}\cdot\text{À}\cdot\text{ñ}}{\text{ñ}}} = \frac{\text{À}}{\text{ì}^2}.$$

Подставим в нее численные значения и получим:

$$j = \sqrt{\frac{2}{32{,}1\cdot 10^{-8}}} = 2{,}5\cdot 10^3\ \frac{\text{À}}{\text{ì}^2}.$$

ЗАДАЧИ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 1

1.1 Материальное тело двигалось в течение t_1 = 5 с со скоростью v_1 = 2 м/с, в течение t_2 = 4 с со скоростью v_2 = 5 м/с и в течение t_3 = 3 с со скоростью v_3 =10 м/с. Определить среднюю путевую скорость материального тела.

1.2 Половину своего пути автомобиль прошел со скоростью 80 км/ч, остальную часть пути – со скоростью 50 км/ч. Какова средняя путевая скорость автомобиля?

1.3 Автомобиль движется со скоростью 40 м/с. На протяжении 30 м производится торможение, после чего скорость уменьшается до 10 м/с. Считая движение автомобиля равнозамедленным, найти ускорение и время торможения.

1.4 Самолет для взлета должен иметь скорость 100 м/с, длина разбега при этом составляет 600 м. Определить время разбега и ускорение. Движение самолета считать равноускоренным.

1.5 Определить начальную скорость, которую необходимо сообщить брошенному вертикально вверх телу, чтобы оно вернулось обратно через 6 с. Чему равна максимальная высота подъема тела?

1.6 С балкона бросили мяч вертикально вверх с начальной скоростью v_0 = 6 м/с. Через t = 4 с мяч упал на землю. Определить высоту балкона над землей и скорость мяча в момент падения.

1.7 Рядом с поездом на одной линии с передними буферами паровоза стоит человек. В момент, когда поезд начал двигаться с ускорением a = 0,1 м/с^2, человек начал идти в том же направлении со скоростью v = 1,5 м/с. Через какое время поезд нагонит человека? Определить скорость поезда в этот момент и путь, пройденный за это время человеком.

1.8 Линейная скорость v_1 точек на окружности вращающегося диска равна 3 м/с. Точки, расположенные на ΔR = 12 см ближе к оси, имеют линейную скорость v_2 = 2 м/с. Определить угловую скорость ω и частоту вращения n диска.

1.9 Колесо, спустя t = 2 мин после начала вращения, приобретает скорость, соответствующую частоте вращения n = 660 об/мин. Найти угловую скорость колеса и число оборотов колеса за это время. Движение считать равноускоренным.

1.10 Точка движется по окружности радиусом R = 10 см с постоянным тангенциальным ускорением a_τ. Найти нормальное ускорение a_n точки через Δt = 10 с после начала движения, если известно, что к концу десятого оборота после начала движения линейная скорость точки равна v = 3 м/с.

1.11 Велосипедное колесо вращается с частотой n = 4 с$^{-1}$. Под действием сил трения оно остановилось через интервал времени Δt = 1 мин. Определить угловое ускорение ε и число оборотов N, которое сделает колесо за это время.

1.12 Колесо радиусом R = 30 см вращается с постоянным угловым ускорением ε = 3 рад/с^2. Найти для точек на ободе колеса к концу третьей секунды после начала движения: 1) угловую и линейную скорости; 2) тангенциальное, нормальное и полное ускорения.

1.13 На цилиндр, который может вращаться около горизонтальной оси, намотана нить. К концу нити привязан грузик, которому предоставлена возможность опускаться. Двигаясь равноускоренно, грузик за t = 6 с опустился на h = 2 м. Определить угловое ускорение ε цилиндра, если его радиус R = 4 см.

1.14 Вал вращается с постоянной скоростью, соответствующей частоте n = 360 об/мин. С некоторого момента вал тормозится и вращается равнозамедленно с угловым ускорением, численно равным 6 рад/с^2. 1) Через какое время вал остановится? 2) Сколько оборотов он сделает до остановки?

1.15 Два бруска массами m_1 = 2 кг и m_2 = 4 кг, соединенные шнуром, лежат на столе. С каким ускорением a будут двигаться бруски, если к одному из них приложить силу F = 10 Н, направленную горизонтально? Какова будет сила T натяжения шнура, соединяющего бруски, если силу приложить: к первому бруску? ко второму бруску? Трением пренебречь.

1.16 На столе стоит тележка массой m_1 = 3 кг. К тележке привязан один конец шнура, перекинутого через блок. С каким ускорением a будет двигаться тележка, если к другому концу шнура привязана гиря массой m_2 = 1 кг?

1.17 К нити подвешен груз массой m = 0,5 кг. Найти натяжение нити, если нить с грузом: 1) поднимается с ускорением a = 1 м/с^2; 2) опускается с тем же ускорением a = 1 м/с^2.

1.18 Какую силу надо приложить к вагону, стоящему на рельсах, чтобы вагон стал двигаться равноускоренно и за время t = 1 мин прошел путь S = 50 м? Масса вагона m = 12 т. Во время движения на вагон действует сила трения, равная 0,05 силы тяжести вагона.

1.19 К потолку трамвайного вагона подвешен на нити шар. Вагон тормозится, и его скорость равномерно изменяется за время Δt = 3 с от v_1 = 20 км/ч до v_2 = 5 км/ч. На какой угол α отклонится при этом нить с шаром?

1.20 Масса лифта с пассажирами равна m = 700 кг. Найти, с каким ускорением и в каком направлении движется лифт, если известно, что натяжение троса, поддерживающего лифт, равно: 1) T_1 = 200 Н; 2) T_2 = 7 кН.

1.21 К пружинным весам подвешен блок. Через блок перекинут шнур, к концам которого привязаны грузы массами m_1 = 1 кг и m_2 = 4 кг. Каково будет показание весов во время движения грузов? Массой блока и шнура пренебречь.

1.22 На автомобиль массой m = 1 т во время движения действует сила трения, равная 0,1 его силы тяжести. Найти силу тяги, развиваемую мотором автомобиля, если автомобиль движется с постоянной скоростью: 1) в гору с уклоном 1 м на каждые 25 м пути; 2) под гору с тем же уклоном.

1.23 Наклонная плоскость, образующая угол $\alpha = 30°$ с плоскостью горизонта, имеет длину $l = 5$ м. Тело, двигаясь равноускоренно, соскользнуло с этой плоскости за время $t = 4$ с. Определить коэффициент трения μ тела о плоскость.

1.24 Диск радиусом $R = 20$ см вращается вокруг вертикальной оси. На краю диска лежит кубик. Принимая коэффициент трения $\mu = 0,2$, найти частоту n вращения, при которой кубик соскользнет с диска.

1.25 Самолет описывает петлю Нестерова радиусом $R = 300$ м. Во сколько раз сила F, с которой летчик давит на сиденье в нижней точке, больше силы тяжести летчика, если скорость самолета $v = 120$ м/с.

1.26 Через блок, имеющий форму диска, перекинут шнур. К концам шнура привязаны грузики массами $m_1 = 200$ г и $m_2 = 300$ г. С каким ускорением a будут двигаться грузики, если масса m блока равна 500 г? Трением в блоке пренебречь.

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

1.28 Автомат выпускает 660 пуль в минуту. Масса каждой пули равна $m = 4$ г, ее начальная скорость $v = 450$ м/с. Найти среднюю силу отдачи при стрельбе.

1.29 Ракета, масса которой в начальный момент $m_0 = 12$ кг, запущена вертикально вверх. Определить ускорение, с которым двигалась ракета через $t = 5$ с после запуска, если скорость расхода горючего вещества $\mu = 0,5$ кг/с, а относительная скорость выхода продуктов сгорания $u = 90$ м/с. Сопротивление воздуха не учитывать.

1.30 На железнодорожной платформе установлено орудие. Масса платформы с орудием $M = 11$ т. Орудие стреляет вверх под углом $\varphi = 60°$ к горизонту в направлении движения. С какой скоростью v_1 покатится платформа после отдачи, если масса снаряда m = 15 кг, и он вылетает со скоростью v_2 = 500 м/с.

1.31 Сани массой m = 120 кг движутся ускоренно в горизонтальном направлении. Действующая сила $F = 10^3$ Н приложена под углом $\alpha = 30°$ к горизонту. Коэффициент трения μ = 0,06. Определить ускорение.

1.32 Тело массой m = 300 кг поднимают по наклонной плоскости с ускорением a = 3 м/с^2. Какую силу, параллельную наклонной плоскости, необходимо приложить для подъема тела? Коэффициент трения соприкасающихся поверхностей μ = 0,1, угол наклона 30°.

1.33 Рабочий, сила тяжести которого P = 0,9 кН, равномерно поднимает груз массой 60 кг вертикально вверх с помощью каната, перекинутого через неподвижный блок. С какой силой рабочий давит на землю?

1.34 На баржу, привязанную к берегу тросом длиной l = 10 м, действует сила трения воды $F_т = 3\cdot10^2$ Н и сила давления ветра $F_д = 2\cdot10^2$ Н, действующего с берега перпендикулярно к нему. С какой силой натянут трос, если баржа находится в равновесии? На каком расстоянии от берега она расположится?

1.35 Вагонетка массой m = 2 т равномерно поднимается по эстакаде, угол наклона которой $\varphi = 30°$. Определить силу натяжения троса, с помощью которого поднимают вагонетку, если коэффициент трения μ = 0,2.

1.36 Определить работу растяжения двух соединенных последовательно пружин жесткостью k_1 = 200 Н/м и k_2 = 150 Н/м, если первая пружина при этом растянулась на l = 2 см.

1.37 Если на верхний конец вертикально расположенной спиральной пружины положить груз, то пружина сожмется на Δl = 3 мм. На сколько сожмет пружину тот же груз, упавший на конец пружины с высоты h = 8 см?

1.38 Определить жесткость k системы двух пружин при последовательном и параллельном их соединениях. Жесткость пружин k_1 = 1 кН/м и k_2 = 2 кН/м.

1.39 Две пружины жесткостью k_1 = 0,2 кН/м и k_2 = 0,4 кН/м скреплены параллельно. Определить потенциальную энергию данной системы при абсолютной деформации Δl = 4 см.

1.40 Определить работу растяжения двух соединенных последовательно пружин жесткостью k_1 = 800 Н/м и k_2 = 500 Н/м, если первая пружина при этом растянулась на l = 3 см.

1.41 Деревянным молотком, масса которого m = 0,6 кг, ударяют о неподвижную стенку. Скорость молотка в момент удара v = 1 м/с. Считая коэффициент восстановления при ударе $k_в$ = 0,5, найти количество теплоты, выделившееся при ударе (коэффициентом восстановления материала тела называется отношение скорости тела после удара к его скорости до удара).

1.42 Стальной шарик массой m = 60 г, падая с высоты h_1 = 1 м на стальную плиту, отскакивает от нее на высоту h_2 = 60 см. Найти: 1) импульс силы, полученный плитой за время удара; 2) количество теплоты, выделившееся при ударе.

1.43 По гладкой плоскости скользят навстречу друг другу без трения два упругих шарика с массами m_1 = 20 г и m_2 = 50 г и скоростями соответственно v_1 = 2 м/с, v_2 = 1 м/с. Определить их скорости после центрального удара.

1.44 Два конькобежца массами m_1 = 80 кг и m_2 = 60 кг держались за концы длинного натянутого шнура, неподвижно стоя на льду один против другого. Один из них начинает укорачивать шнур, выбирая его со скоростью v = 1 м/с. С какими скоростями u_1 и u_2 будут двигаться по льду конькобежцы? Трением пренебречь.

1.45 Человек, стоящий на неподвижной тележке, бросает вперед в горизонтальном направлении камень массой m = 2 кг. Тележка с человеком покатилась назад, и в начальный момент времени после бросания ее скорость была равной u_2 = 0,1 м/с. Найти кинетическую энергию брошенного камня через 1 с после начала его движения. Масса тележки с человеком равна 130 кг.

1.46 Пружина жесткостью k = 400 Н/м сжата силой F = 70 Н. Определить работу A внешней силы, дополнительно сжимающей эту пружину еще на Δl = 1 см.

1.47 Под действием постоянной силы F вагонетка прошла путь l = 8 м и приобрела скорость v = 3 м/с. Определить работу силы, если масса вагонетки m = 400 кг и коэффициент трения μ = 0,03.

1.48 Вычислить работу, совершаемую при равноускоренном подъеме груза массой m = 60 кг на высоту h = 5 м за время t = 2 с.

1.49 Конькобежец, стоя на льду, бросил вперед гирю массой m_1 = 2 кг и вследствие отдачи покатился назад со скоростью v_2 = 1 м/с. Масса конькобежца m_2 = 70 кг. Определить работу A, совершаемую конькобежцем при бросании гири.

1.50 Камень брошен вверх под углом φ = 60° к плоскости горизонта. Кинетическая энергия камня в начальный момент равна T_0 = 40 Дж. Определить кинетическую T и потенциальную Π энергии камня в высшей точке его траектории. Сопротивлением воздуха пренебречь.

1.51 Для определения мощности мотора на его шкив диаметром D = 8 см накинули ленту. К одному концу ленты прикреплен динамометр, к другому подвешен груз P. Найти мощность N мотора, если мотор вращается с частотой n = 20 с$^{-1}$, масса груза m = 1 кг и показания динамометра F = 30 Н.

1.52 Сколько времени t будет скатываться без скольжения обруч с наклонной плоскости длиной l = 5 м и высотой h = 1 м.

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

1.54 Определить работу A, которую совершают силы гравитационного поля Земли, если тело массой m = 1 кг упадет на поверхность Земли: 1) с высоты h, равной радиусу Земли; 2) из бесконечности. Радиус Земли $R_З$ и ускорение свободного падения g_0 на ее поверхности считать известными.

1.55 Искусственный спутник Земли движется по круговой орбите в плоскости экватора с запада на восток. На каком расстоянии от поверхности Земли должен находиться этот спутник, чтобы он был неподвижен по отношению к наблюдателю, который находится на Земле?

1.56 Автомобиль двигается со скоростью v = 90 км/ч. Коэффициент трения между шинами и дорогой μ = 0,6. Определить минимальное расстояние, на котором машина может быть остановлена.

1.57 Груз массой m = 70 кг равноускоренно поднимают на высоту h = 10 м за время t = 6 с. Вычислить работу, совершаемую при подъеме груза.

1.58 Автомобиль движется по мосту, имеющему форму дуги окружности радиуса R = 60 м, обращенной своей выпуклостью вверх. Какое максимальное горизонтальное ускорение может развить автомобиль в высшей точке моста, если скорость его в этой точке v = 60 км/ч, а коэффициент трения автомобиля о мост μ = 0,6?

1.59 Рельс длиной l = 10 м, расположенный горизонтально, поднимают равномерно на двух параллельных тросах. Найти силу натяжения тросов, если один из них укреплен на конце рельса, а другой – на расстоянии l_2 = 1 м от противоположного конца. Сила тяжести, действующая на рельс, P = 9 кН.

1.60 К середине резинового шнура длиной l = 1,2 м, расположенного горизонтально, подвешена гиря массой m = 0,5 кг. Под действием гири шнур провис на Δh = 0,2 м. Определить жесткость шнура, если деформация шнура упругая. Массой шнура пренебречь.

1.61 Стальной и медный стержни, длины которых равны соответственно l_1 = 0,7 м и l_2 = 0,4 м, а сечения $S_1 = S_2$ = 1 см^2, скреплены концами. Вычислить удлинение стержней, если растягивающая их сила F = 200 Н.

1.62 Гиря массой m = 8 кг, привязанная к проволоке, вращается с частотой n = 1 с$^{-1}$ вокруг вертикальной оси, проходящей через конец проволоки, скользя при этом без трения по горизонтальной поверхности. Длина проволоки l = 1 м, площадь ее поперечного сечения S = 3 мм^2. Найти напряжение σ материала проволоки. Массой её пренебречь.

1.63 Шар катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Полная кинетическая энергия шара T = 21 Дж. Определить кинетическую энергию T_1 поступательного и T_2 вращательного движений шара.

1.64 Тело массой m_1 = 3 кг, двигаясь горизонтально со скоростью v_1 = 2 м/с, догоняет второе тело массой m_2 = 1 кг и неупруго сталкивается с ним. Какую скорость получат тела, если: 1) второе тело стояло неподвижно; 2) второе тело двигалось со скоростью v_2 = 1 м/с в том же направлении, что и первое; 3) второе тело двигалось со скоростью v_2 = 1 м/с в направлении, противоположном направлению движения первого тела.

1.65 Тело массой m_1 = 5 кг движется навстречу второму телу массой m_2 = 3 кг и неупруго сталкивается с ним. Скорость тел непосредственно перед столкновением была равна соответственно v_1 = 1 м/с и v_2 = 2 м/с. Сколько времени будут двигаться эти тела после столкновения, если коэффициент трения μ = 0,1.

1.66 На полу стоит тележка в виде длинной доски, снабженной легкими колесами. На одном конце доски стоит человек. Масса человека M = 80 кг, масса доски m = 20 кг. С какой скоростью u (относительно пола) будет двигаться тележка, если человек пойдет вдоль доски со скоростью (относительно доски) v = 1 м/с? Массой колес пренебречь. Трение не учитывать.

1.67 Тонкий однородный стержень длиной l = 60 см и массой m = 300 г вращается с угловым ускорением ε = 2 рад/с^2 около оси, проходящей перпендикулярно стержню, через точку, делящую стержень в отношении 1:3. Определить вращающий момент M.

1.68 К ободу однородного диска радиусом R = 0,2 м приложена постоянная касательная сила F = 100 Н. При вращении на диск действует момент сил трения $M_{тр}$ = 5 Н·м. Найти массу m диска, если известно, что диск вращается с постоянным угловым ускорением ε = 100 рад/с^2.

1.69 К ободу колеса радиусом R = 0,3 м и массой m = 40 кг приложена касательная сила F = 90 Н. Найти: 1) угловое ускорение колеса; 2) через какое время после начала действия силы колесо будет иметь скорость, соответствующую частоте вращения 100 об/с.

1.70 Колесо, имеющее момент инерции I = 200 кг·м^2, вращается, делая 20 об/с. Через минуту после того, как на колесо перестал действовать вращающий момент, оно остановилось. Найти: 1) момент сил трения; 2) число оборотов, которое сделало колесо до полной остановки после прекращения действия сил.

1.71 Вал массой m = 80 кг и радиусом R = 4 см вращается с частотой n = 10 с$^{-1}$. К цилиндрической поверхности вала прижали тормозную колодку с силой F = 80 Н, под действием которой вал остановился через t = 5 с. Определить коэффициент трения.

1.72 Маховик радиусом R = 0,1 м и массой m = 6 кг соединен с мотором при помощи приводного ремня. Натяжение ремня, идущего без скольжения, постоянно и равно T = 15 Н. Какова будет частота вращения маховика колеса через Δt = 10 с после начала движения? Маховик считать ободом. Трением пренебречь.

1.73 На барабан радиусом R = 0,5 м намотан шнур, к концу которого привязан груз массой m = 10 кг. Найти момент инерции барабана, если известно, что груз опускается с ускорением a = 3 м/с^2.

1.74 Две гири разной массы соединены нитью и перекинуты через блок, момент инерции которого I = 50 кг·м^2 и радиус R = 20 см. Блок вращается с трением и момент сил трения M = 90 Н·м. Найти разность натяжения нити ($T_1 - T_2$) по обе стороны блока, если известно, что блок вращается с постоянным угловым ускорением ε = 3 рад/с^2.

1.75 Однородный тонкий стержень массой m_1 = 0,4 кг и длиной l = 1 м может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси Z, проходящей через точку, которая делит стержень в отношении 1:2. В верхний конец стержня попадает пластилиновый шарик, летящий горизонтально (перпендикулярно оси Z) со скоростью $v = 10$ м/с, и прилипает к стержню. Масса шарика $m_2 = 20$ г. Определить угловую скорость ω стержня и линейную скорость u нижнего конца стержня в начальный момент времени.

1.76 Платформа в виде диска радиусом $R = 1$ м вращается по инерции с частотой $n_1 = 4$ мин$^{-1}$. На краю платформы стоит человек, масса которого $m = 70$ кг. С какой частотой n_2 будет вращаться платформа, если человек перейдет в ее центр? Момент инерции платформы $I = 100$ кг·м^2. Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

1.77 Горизонтальная платформа массой $M = 200$ кг и радиусом $R = 1$ м вращается с угловой скоростью, соответствующей частоте $n = 20$ об/мин. В центре платформы стоит человек и держит в расставленных руках гири. Какова будет частота вращения платформы, если человек, опустив руки, уменьшает свой момент инерции с 3 до 1 кг·м^2? Считать платформу однородным круглым диском.

1.78 Платформа, имеющая форму диска, может вращаться около вертикальной оси. На краю платформы стоит человек массой $m_1 = 75$ кг. На какой угол φ повернется платформа, если человек пойдет вдоль края платформы и, обойдя его, вернется в исходную точку на платформе? Масса платформы $m_2 = 100$ кг. Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

1.79 Человек массой $m_1 = 80$ кг находится на платформе массой $m_2 = 60$ кг. Какое число оборотов в минуту будет делать платформа, если человек будет двигаться по окружности радиусом $R_1 = 5$ м вокруг оси вращения? Скорость движения человека относительно платформы $v_1 = 5$ км/ч. Радиус платформы $R_2 = 8$ м. Считать платформу однородным диском, а человека – материальной точкой.

1.80 На скамье Жуковского стоит человек и держит в руках стержень длиной $l = 2{,}4$ м и массой $m = 8$ кг, расположенный вертикально по оси вращения скамейки. Скамья с человеком вращается с частотой

n_1 = 1 $с^{-1}$. С какой частотой n_2 будет вращаться скамья с человеком, если он повернет стержень в горизонтальное положение? Суммарный момент инерции человека и скамьи I = 6 кг·$м^2$.

1.81 Два сосуда одинакового объема содержат кислород. В одном сосуде давление p_1 = 100 кПа и температура T_1 = 500 К, в другом – p_2 = 150 кПа, а T_2 = 300 К. Сосуды соединили и охладили находящийся в них кислород до T = 280 К. Определить установившееся в сосудах давление p.

1.82 Под давлением p_1 = 200 кПа находятся 20 г кислорода при температуре t_1 = 20 °С. Вследствие нагревания при постоянном давлении кислород расширился и занял объем V_2 = 10 л. Найти: объем газа V_1 до расширения; температуру T_2 газа после расширения; плотность ρ_1 газа до расширения; плотность ρ_2 газа после расширения.

1.83 В баллоне находится газ при температуре T_1 = 300 К. До какой температуры T_2 надо нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 2 раза?

1.84 В баллоне вместимостью V = 10 л находится аргон под давлением p_1 = 300 кПа и при температуре T_1 = 300 К. Когда из баллона было взято некоторое количество газа, давление в баллоне понизилось до p_2 = 200 кПа, а температура установилась T_2 = 240 К. Определить массу m аргона, взятого из баллона.

1.85 В баллоне объемом V = 10 л находится углекислый газ под давлением p = 0,5 МПа и при температуре T = 300 К. Определить массу m углекислого газа.

1.86 Углекислый газ массой 10 г при температуре t_1 = 27 °С находится под давлением p_1 = 200 кПа. Вследствие нагревания при постоянном давлении углекислый газ расширился и занял объем V_2 = 5 л. Найти: объем газа V_1 до расширения; температуру T_2 газа после расширения; плотность ρ_1 газа до расширения; плотность ρ_2 газа после расширения.

1.87 Каков может быть наименьший V объем баллона, вмещающего m = 3,2 кг кислорода, если его стенки при температуре t = 20 °С выдерживают давление p = 1 МПа.

1.88 Вычислить плотность ρ азота, находящегося в баллоне под давлением p = 1 МПа и имеющего температуру T = 273 К.

1.89 Углекислый газ (CO_2) массой m_1 = 6 г и закись азота (N_2O) массой m_2 = 3 г заполняют сосуд объемом V = 3 дм^3. Каково общее давление в сосуде при температуре t = 127 °С?

1.90 Одна треть молекул азота массой m = 9 г распалась на атомы. Определить полное число N частиц, находящихся в колбе.

1.91 Определить количество вещества ν и число N молекул азота массой m = 0,14 кг.

1.92 Какой объем занимает смесь азота массой m_1 = 0,1 кг и гелия массой m_2 = 0,1 кг при нормальных условиях?

1.93 Найти массу m воздуха, заполняющего аудиторию высотой h = 3 м и площадью пола S = 80 м^2. Давление воздуха p = 0,1 МПа, температура помещения t = 22 °С.

1.94 Газ находится при температуре T = 154 К и давлении p = 2,8 МПа, при этом имеет плотность ρ = 6,1 кг/м^3. Определите какой это газ.

1.95 Определить плотность ρ водяного пара, находящегося под давлением p = 5 кПа и имеющего температуру T = 330 К.

1.96 Ручной поршневой насос захватывает из атмосферы при каждом качании V_1 = 50 см^3 воздуха. Сколько качаний нужно сделать насосом для того, чтобы давление p в камере велосипедной шины объемом V = 2 дм^3 повысилось на 0,1 МПа? Давление атмосферного воздуха p_0 = 0,1 МПа. Нагревом воздуха в процессе сжатия пренебречь.

1.97 Найти плотность ρ газовой смеси, состоящей по массе из одной части водорода и восьми частей кислорода, при давлении p = 100 кПа и температуре T = 300 К.

1.98 В закрытом сосуде вместимостью V = 1 м^3 находятся вода массой m_1 = 1,8 кг и кислород массой m_2 = 1,6 кг. Найти давление p в сосуде при температуре t = 380 °С, зная, что при этой температуре вся вода превращается в пар.

1.99 В сосуде вместимостью V = 20 л находится кислород при температуре T = 300 К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 50 кПа. Определить массу m израсходованного кислорода. Процесс считать изотермическим.

1.100 В сосуде находится смесь из m_1 = 10 г углекислого газа и m_2 = 40 г азота. Найти плотность этой смеси при температуре t = 27 °С и давлении $p = 2 \cdot 10^5$ Н/м^2.

1.101 В сосуде объемом V = 0,5 м^3 содержится смесь газов: азота массой m_1 = 4 г и кислорода массой m_2 = 20 г при температуре T = 293 К. Определить давление p смеси газов.

1.102 В 1 кг сухого воздуха содержится m_1 = 232 г кислорода и m_2 = 768 г азота (массами других газов пренебрегаем). Определить молярную массу воздуха.

1.103 Колба вместимостью V = 0,2 л содержит газ при нормальных условиях. Определить число N молекул газа, находящихся в колбе.

1.104 В сосуде объемом V = 0,2 м^3 содержится смесь газов: азота массой m_1 = 50 г и водорода массой m_2 = 20 г при температуре T = 293 К. Определить давление p смеси газов.

1.105 В сосуде вместимостью V = 2 л находится водород массой m = 5 г. Какое количество N молекул находится в объеме V_1 = 1 см^3 этого сосуда?

1.106 В колбе вместимостью V = 100 см^3 содержится некоторый газ при температуре T = 300 К. На сколько понизится давление p газа в колбе, если вследствие утечки газа из колбы вышло $\Delta N = 10^{20}$ молекул?

1.107 Масса m_0 пылинки равна 10^{-8} г. Во сколько раз она больше массы молекулы m воздуха? Молярная масса μ воздуха равна 29 г/моль.

1.108 В сосуде вместимостью $V = 2{,}24$ л при нормальных условиях находится кислород. Определить количество вещества ν и массу m кислорода, а также концентрацию n его молекул в сосуде.

1.109 Определить среднее значение $\langle\varepsilon\rangle$ полной кинетической энергии одной молекулы гелия, кислорода и водяного пара при температуре $T = 300$ К.

1.110 Чему равна энергия E теплового движения всех молекул, содержащихся в $m = 30$ г кислорода при температуре $t = 20$ °С? Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения и какая – на долю вращательного движения?

1.111 Определить кинетическую энергию $\langle\varepsilon_i\rangle$, приходящуюся в среднем на одну степень свободы i молекулы азота при температуре $T = 2$ К , а также среднюю кинетическую энергию $\langle\varepsilon_п\rangle$ поступательного движения, среднюю кинетическую энергию $\langle\varepsilon_в\rangle$ вращательного движения и среднее значение полной кинетической энергии $\langle\varepsilon\rangle$ одной молекулы.

1.112 Взвешенные в воздухе мельчайшие пылинки движутся так же, как и очень крупные молекулы. Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв}\rangle$ пылинки массой $m = 10^{-10}$ г, если температура воздуха равна 30 °С.

1.113 При какой температуре T молекулы кислорода имеют такую же среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв}\rangle$, как молекулы водорода при температуре $T_1 = 100$ К?

1.114 Смесь гелия и аргона находится при температуре T = 200 К. Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв} \rangle$ и среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon \rangle$ атомов гелия и аргона.

1.115 В азоте взвешены мельчайшие пылинки, которые движутся так, как если бы они были очень крупными молекулами. Масса каждой пылинки $m = 2 \cdot 10^{-10}$ г. Газ находится при температуре T = 300 К. Определить средние квадратичные скорости $\langle v_{кв} \rangle$ и средние кинетические энергии $\langle \varepsilon \rangle$ поступательного движения молекулы азота и пылинки.

1.116 Сколько степеней свободы i имеет молекула, обладающая средней кинетической энергией теплового движения $\langle \varepsilon \rangle = 9{,}7 \cdot 10^{-21}$ Дж при температуре 7 °С?

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

1.118 Барометр в кабине летящего вертолета показывает давление p = 90 кПа. На какой высоте h летит вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал давление p_0 = 100 кПа? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не меняется с высотой.

1.119 На сколько уменьшится атмосферное давление p = 100 кПа при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту h = 100 м? Считать, что температура воздуха T равна 290 К и не изменяется с высотой.

1.120 На какой высоте плотность ρ_1 газа составляет 50 % от плотности ρ_2 его на уровне моря? Температуру T считать постоянной и равной 273 К. Задачу решить для воздуха и водорода.

1.121 Давление p газа равно 1 Па, концентрация n его молекул равна 10^{10} см$^{-3}$. Определить: температуру T газа; среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_п \rangle$ поступательного движения молекул газа.

1.122 Двухатомный газ массой m = 1 кг находится под давлением $p = 8\cdot10^4$ Па и имеет плотность ρ = 4 кг/м^3. Найти энергию E теплового движения всех молекул газа при этих условиях.

1.123 Определить среднюю квадратичную скорость $<v_{кв}>$ молекулы газа, заключенного в сосуд вместимостью V = 5 л под давлением p = 150 кПа. Масса газа m = 0,5 г.

1.124 Баллон вместимостью V = 5 л содержит водород массой m = 2 г. Определить среднюю длину $< l >$ свободного пробега.

1.125 Найти среднюю длину $< l >$ свободного пробега молекул водорода при давлении p = 100 Па и температуре T = 300 К.

1.126 Найти коэффициент теплопроводности λ кислорода при температуре t = 27 °С и давлении $p = 10^5$ Н/см^2.

1.127 Найти коэффициент внутреннего трения η азота при нормальных условиях, если коэффициент диффузии D для него при этих условиях равен 0,142 см^2/с.

1.128 Найти коэффициент теплопроводности λ водорода, если известно, что коэффициент внутреннего трения η для него при этих условиях равен $8{,}6\cdot10^{-6}$ (Н·с)/м^2.

1.129 Коэффициент диффузии углекислого газа при нормальных условиях D = 10 мм^2/с. Определить коэффициент внутреннего трения η углекислого газа при этих условиях.

1.130 Найти среднее число $<z>$ столкновений в 1 секунду молекул углекислого газа при температуре t = 100 °С, если средняя длина свободного пробега $< l >$ при этих условиях равна $8{,}75\cdot10^{-3}$ см.

1.131 Найти среднее число $<z>$ столкновений, испытываемых в течение t = 1 с молекулой кислорода при нормальных условиях.

1.132 Определить плотность ρ разряженного водорода, если средняя длина свободного пробега $< l >$ молекул равна 1 мкм.

1.133 Найти среднюю длину $< l >$ свободного пробега молекул азота при нормальных условиях, с учетом, что его динамическая вязкость равна $\eta = 21$ мкПа·с.

1.134 Найти среднюю продолжительность свободного пробега $<\tau>$ молекул кислорода при температуре $T = 273$ К и давлении $p = 150$ Па.

1.135 Средняя длина $< l >$ свободного пробега атомов гелия при нормальных условиях равна 2 мкм. Определить коэффициент диффузии D гелия.

1.136 Коэффициент диффузии D кислорода при температуре $t = 0$ °С равен 0,15 см^2/с. Определить среднюю длину $< l >$ свободного пробега молекул кислорода.

1.137 Найти среднюю длину свободного пробега $< l >$ атомов гелия в условиях, когда плотность гелия $\rho = 3{,}2\cdot10^{-3}$ кг/м^3.

1.138 В сферической колбе вместимостью $V = 3$ л, содержащей азот, создан вакуум с давлением $p = 90$ мкПа. Температура азота $T = 240$ К. Можно ли считать вакуум в колбе высоким, если таким считается вакуум, в котором длина $< l >$ свободного пробега молекул много больше линейных размеров сосуда.

1.139 Найти массу m азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку $S = 1$ м^2 за $\tau = 10$ с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном к площадке, равен 1,26 кг/м^4. Температура азота $t = 27$ °С, средняя длина свободного пробега молекул азота $< l > = 10^{-5}$ м.

1.140 При каком давлении p отношение коэффициента внутреннего трения η некоторого газа к коэффициенту его диффузии D равно 0,5 г/л, а средняя квадратичная скорость $<v_{кв}>$ его молекул равна 600 м/с?

1.141 Найти коэффициент диффузии D и коэффициент внутреннего трения η воздуха при давлении $p = 10^5$ Па и температуре $t = 20$ °С. Диаметр d молекул воздуха принять равным $3\cdot10^{-10}$ м.

1.142 В сосуде объемом V = 3 л находится $N = 8\cdot10^{22}$ молекул двухатомного газа. Коэффициент теплопроводности газа λ = 0,014 Вт/(м·К). Найти коэффициент диффузии D газа при этих условиях.

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

1.144 Для некоторого двухатомного газа удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 1{,}4\cdot10^3$Дж/(кг·К). Чему равна масса одного киломоля этого газа?

1.145 Трехатомный газ под давлением p = 150 кПа и температуре t = 27 °С занимает объем V = 8 л. Определить молярную теплоемкость газа C_p при постоянном давлении.

1.146 Чему равны удельные теплоемкости c_p и c_v некоторого двухатомного газа, если плотность ρ этого газа при нормальных условиях равна 1,5 кг/м^3?

1.147 Азот массой m = 1 кг, нагретый на T = 100 К, сохранил неизменным объем V. Найти количество теплоты Q, сообщенное газу; изменение внутренней энергии ΔU и совершенную газом работу A.

1.148 При адиабатическом сжатии кислорода массой m = 1 кг совершена работа A = 100 кДж. Определить конечную температуру T_2 газа, если до сжатия кислород находился при температуре T_1 = 300 К.

1.149 Водяной пар расширяется при постоянном давлении. Определить работу A расширения, если пару передано количество теплоты Q = 4 кДж.

1.150 Азот нагревался при постоянном давлении, причем ему было сообщено количество теплоты Q = 1,8 кДж. Определить работу A, которую совершил при этом газ, и изменение ΔU его внутренней энергии.

1.151 Объем V водорода при изотермическом расширении при температуре T = 300 К увеличился в 2 раза. Определить работу A, совершенную газом, и теплоту Q, полученную газом при этом процессе. Масса m водорода равна 100 г.

1.152 Определить количество теплоты Q, которое надо сообщить кислороду объемом V = 10 л при его изохорном нагревании, чтобы давление газа повысилось на Δp = 0,3 кПа.

1.153 Закрытый баллон вместимостью V = 0,9 м^3 заполнен азотом под давлением p_1 = 2,2 10^3 Па при температуре T_1 = 300 К. Газу сообщили Q = 4,5·10^3 Дж тепла. Определить температуру T_2 и давление p_2 газов в конце процесса.

1.154 Азот массой m = 100 г нагревают при постоянном давлении от температуры t_1= 20 °С до t_2 = 220 °С. Какое количество теплоты Q поглощается при этом? Каков прирост внутренней энергии ΔU газа? Какая работа A совершается газом?

1.155 Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, получает за каждый цикл от нагревателя теплоту Q_1 = 500 кДж. Температура нагревателя T_1 = 400 К, температура холодильника T_2 = 280 К. Найти работу A, совершаемую машиной за один цикл, и количество тепла Q_2, отдаваемого холодильнику.

1.156 Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура теплоотдатчика T_1 = 400 К, теплоприемника – T_2 = 260 К. Определить термический КПД цикла; работу A_1 рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа A_2 = 80 Дж.

1.157 Газ, совершающий цикл Карно, получает теплоту Q_1 = 16 кДж. Определить температуру T_1 теплоотдатчика, если при температуре теплоприемника T_2 = 300 К работа A цикла равна 8 кДж.

1.158 В цикле Карно газ получил от теплоотдатчика теплоту Q_1 = 600 кДж и совершил работу A = 200 Дж. Температура теплоотдатчика T_1 = 350 К. Определить температуру T_2 теплоприемника.

1.159 Азот массой m = 10,5 г изотермически расширяется от объема V_1= 2 л до объема V_2 = 5 л. Найти прирост энтропии ΔS при этом процессе.

1.160 Водород массой m = 6,6 г расширяют изобарически до удвоения объема. Найти изменение энтропии ΔS при этом расширении.

1.161 Два одинаковых металлических шарика имеют заряды q_1 = 3,5 нКл и q_2 = 5,5 нКл. Найти силу их взаимодействия после соприкосновения и удаления друг от друга на расстояние 10 см.

1.162 Два одинаковых иона на расстоянии 10^{-8} м в вакууме взаимодействуют с силой $9{,}3 \cdot 10^{-12}$ Н. Сколько «лишних» электронов у каждого иона?

1.163 Вычислить ускорение, сообщаемое одним электроном другому, находящемуся от первого на расстоянии 1,5 мм.

1.164 Два одинаковых металлических шарика имеют заряды q_1 = 5,5 мкКл и q_2 = –6,3 мкКл. Найти силу их кулоновского взаимодействия после того, как их привели в соприкосновение, а затем удалили друг от друга на расстояние 2 см. Диаметры шариков существенно меньше расстояния между ними.

1.165 Расстояние между двумя точечными зарядами q_1 = 4 мкКл и q_2 = –8 мкКл равно 10 см. Найти силу, действующую на точечный заряд q_0 = 0,2 мкКл, удаленный на 6 см от первого и на 8 см от второго зарядов.

1.166 Сила электростатического отталкивания уравновешивает силу гравитационного притяжения двух одинаковых капель воды радиусом 0,1 мм. Определить заряд капель.

1.167 Тонкая нить длиной l = 20 см заряжена с линейной плотностью τ = 10 нКл/м. На расстоянии 10 см от нити, против ее середины, находится точечный заряд 1 нКл. Вычислить силу, действующую на этот заряд со стороны заряженной нити.

1.168 В вершинах квадрата помещены точечные положительные заряды по 1 мкКл каждый. Какой заряд надо поместить в центре квадрата, чтобы вся система находилась в равновесии?

1.169 На двух одинаковых капельках воды находится по одному лишнему электрону. Определить радиус капелек, если сила электростатического отталкивания уравновешивает силу их гравитационного притяжения.

1.170 Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в глицерин. Какой должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей не изменился?

1.171 Шарик массой 10 г и зарядом 2 мкКл, подвешенный на нити длиной 1 м, вращается в горизонтальной плоскости вокруг такого же неподвижного шарика. Определить угловую скорость равномерного вращения и силу натяжения нити, если нить образует с вертикалью угол 60°.

1.172 Два заряженных шарика массой по 10 г подвешены на нитях длиной 1 м каждая к одной точке, в которой находится третий шарик с таким же зарядом. Определить заряды шариков и силу натяжения нитей, если угол расхождения их в положении равновесия равен 60°.

1.173 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 не изменился?

1.174 Два одинаковых шарика массой 10 мг каждый подвешены на нитях длиной 0,3 м, закрепленных в одной точке подвеса. Один из шариков отвели в сторону и сообщили ему заряд. После соприкосновения с другим шариком они разошлись так, что нити образовали угол 60°. Определить величину заряда, сообщенного первому шарику.

1.175 Два точечных заряда величиной 1,1 нКл находятся на расстоянии 10 см. С какой силой они действуют на такой же заряд, находящийся на расстоянии 10 см от каждого из них?

1.176 Два шарика массой 10 г каждый подвешены на нитях длиной 1 м так, что они соприкасаются друг с другом. Шарикам сообщают одноименные заряды 50 нКл. На какое расстояние они разойдутся после зарядки?

1.177 В сосуд с трансформаторным маслом погружен алюминиевый шарик радиусом 0,01 м и зарядом 10 мКл. Определить, при какой напряженности вертикального электростатического поля шарик будет находиться во взвешенном состоянии.

1.178 Точечные заряды q_1 = –3 нКл и q_2 = 5 нКл находятся на расстоянии d_1 = 50 см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, лежащей посередине между зарядами. Чему будет равна напряженность, если первый заряд положительный?

1.179 Точечные заряды q_1 = 5 нКл и q_2 = –10 нКл находятся на расстоянии d = 10 см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, удаленной на расстояние r_1 = 8 см от первого и r_2 = 7 см от второго зарядов.

1.180 Поле создано двумя равномерно заряженными концентрическими сферами радиусами R_1 = 5 см и R_2 = 8 см. Заряды сфер равны q_1 = 2 нКл и q_2 = – 1 нКл соответственно. Определить 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.

1.181 Шар радиусом 10 см равномерно заряжен с объемной плотностью 10 нКл/м^3. Определить напряженность электростатического поля на расстояниях r_1 = 5 см и r_2 = 15 см от центра шара.

1.182 Найти силу F, действующую на заряд q = 9 нКл, находящийся на расстоянии r = 4 см от бесконечно длинной нити, заряженной равномерно с линейной плотностью заряда τ = 20 мкКл/м.

1.183 Капелька воды диаметром 0,1 мм несет такой отрицательный заряд, что напряженность электрического поля на ее поверхности $E_0 = 6 \cdot 10^5$ В/м. Найти напряженность E вертикального поля, удерживающего каплю от падения.

1.184 Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ = 40 нКл/м^2. Параллельно ей расположена прямая тонкая нить, заряженная равномерно с линейной плотностью заряда τ = 0,4 нКл/м. Определить силу, действующую на отрезок нити длиной 1 м.

1.185 Две бесконечные параллельные плоскости несут равномерно распределенные по поверхностям заряды с плотностями $\sigma_1 = 10$ мкКл/м^2 и $\sigma_2 = 5$ мкКл/м^2. Определить силу взаимодействия между пластинами, приходящуюся на площадь $S = 1$ м^2.

1.186 Положительные заряды $q_1 = 20$ мкКл и $q_2 = 40$ мкКл находятся в вакууме на расстоянии $r_1 = 2$ м друг от друга. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния $r_2 = 1$ м.

1.187 Найти силу отталкивания (на единицу длины) двух одноименно заряженных бесконечно длинных параллельных нитей с одинаковой линейной плотностью заряда 5 мкКл/м, находящихся в вакууме на расстоянии 2 см друг от друга. Найти также работу (на единицу длины), которую нужно совершить, чтобы сблизить эти нити до расстояния 1 см.

1.188 Вблизи бесконечной заряженной плоскости находится точечный заряд 10^{-8} Кл. Под действием поля заряд перемещается вдоль силовой линии на расстояние 10 см. При этом совершается работа 1 мДж. Определить поверхностную плотность заряда.

1.189 В вершинах правильного треугольника со стороной 0,1 м расположены заряды 10, 20 и 15 нКл. Определить потенциальную энергию системы.

1.190 Какую работу требуется совершить для того, чтобы два равных заряда 2 мкКл, находящиеся на расстоянии 50 см друг от друга, сблизить до расстояния 20 см?

1.191 Кольцо радиусом 5 см из тонкой проволоки несет равномерно распределенный заряд 10 нКл. Определить потенциал электростатического поля: 1) в центре кольца; 2) на оси, проходящей через центр кольца, в точке, удаленной на расстояние 10 см от центра кольца.

1.192 Сфера радиусом 5 см равномерно заряжена с поверхностной плотностью 2 нКл/м^2. Определить разность потенциалов электростатического поля между точками этого поля, лежащими на расстояниях 10 и 15 см от центра сферы.

1.193 Бесконечно длинная нить заряжена равномерно с линейной плотностью заряда τ = 50 мкКл/м. Найти работу сил поля по перемещению точечного q = 2 нКл с расстояния a = 2,4 см до расстояния b = 4,8 см от нити.

1.194 Две удаленные от остальных тел одинаковые металлические пластины площадью S = 20 см^2 каждая, находятся на расстоянии d = 1 мм друг от друга и заряжены: одна зарядом q_1 = 10 мкКл, вторая – q_2 = –20 мкКл. Найти разность потенциалов $\Delta\varphi$ между ними.

1.195 Металлический шарик диаметром d = 2 см заряжен отрицательно до потенциала φ = 100 В. Сколько избыточных электронов N находится на поверхности шарика?

1.196 Плоская квадратная рамка со стороной длиной a = 10 см находится на некотором расстоянии от бесконечной равномерно заряженной плоскости. Плоскость пластины с линиями поля составляет угол φ = 30°. Поверхностная плотность заряда равна σ = 2 мкКл/м^2. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через эту пластину.

1.197 Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ = 3 мкКл/м^2. На некотором расстоянии от плоскости параллельно ей расположен круг радиусом r = 10 см. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через этот круг.

1.198 Прямоугольная плоская площадка со сторонами, длины которых равны a = 5 см и b = 4 см, находится на расстоянии R = 1 м от точечного заряда q = 3 мкКл. Площадка ориентирована так, что ее плоскость составляет угол φ = 30° с линиями поля. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через площадку.

1.199 В центре сферы радиусом R = 10 см находится точечный заряд q = 10 нКл. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через часть сферической поверхности площадью S = 10 см^2.

1.200 Две бесконечные параллельные плоскости отстоят на расстоянии d = 2 см друг от друга. Плоскости равномерно заряжены с поверхностными плотностями заряда σ_1 = 0,1 мкКл/м^2 и σ_2 = 0,2 мкКл/м^2. Найти разность потенциалов между пластинами.

1.201 В однородное электростатическое поле напряженностью E_0 = 600 В/м перпендикулярно полю помещается бесконечная плоско-параллельная стеклянная пластинка. Определить: 1) напряженность поля внутри пластины; 2) электрическое смещение внутри пластины; 3) поверхностную плотность связанных зарядов на стекле.

1.202 Определить потенциал φ, до которого можно зарядить уединенный металлический шар радиусом R = 5 см, если напряженность поля, при которой происходит пробой воздуха, E = 5 МВ/м. Найти также максимальную поверхностную плотность σ электрических зарядов перед пробоем.

1.203 Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет 1 мм. После зарядки конденсатора до разности потенциалов 300 В между пластинами конденсатора вставили стеклянную пластинку. Определить: 1) диэлектрическую восприимчивость стекла; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стеклянной пластинке.

1.204 Определить поверхностную плотность связанных зарядов на слюдяной пластинке толщиной 1 мм, служащей изолятором плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами конденсатора 220 В.

1.205 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено парафином. Расстояние между пластинами 1 мм. Разность потенциалов равна 2 кВ. Определить: 1) поверхностную плотность зарядов на пластинах конденсатора; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на диэлектрике.

1.206 Поверхностная плотность связанных зарядов на поверхности слюдяной пластинки толщиной 0,2 мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, $\sigma' = 2{,}88\cdot10^{-5}$ Кл/м^2. Найти разность потенциалов между обкладками конденсатора.

1.207 Между пластинами плоского конденсатора находится диэлектрик. На пластины подана разность потенциалов U_1 = 100 В, расстояние между пластинами d = 1 мм. Если, отключив источник напряжения, вынуть диэлектрик из конденсатора, то разность потенциалов между пластинами возрастет до U_2 = 400 В. Найти: а) диэлектрическую проницаемость диэлектрика; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ'.

1.208 Диэлектрик поместили в электрическое поле напряженностью E_0 = 20 кВ/м. Чему равна поляризованность P диэлектрика, если напряженность E среднего макроскопического поля в диэлектрике стала равной 10 кВ/м?

1.209 Определить поляризованность P стекла, помещенного во внешнее электрическое поле напряженностью E_0 = 3 МВ/м.

1.210 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком, молекулы которого можно рассматривать как жесткие диполи с электрическим моментом $2\cdot10^{-30}$ Кл·м. Концентрация диполей равна 10^{26} м$^{-3}$. Определить напряженность среднего макроскопического поля в таком диэлектрике, если при отсутствии диэлектрика напряженность E_0 поля между пластинами равна 100 МВ/м.

1.211 При какой поляризованности P диэлектрика (ε = 5) напряженность среднего макроскопического поля в диэлектрике равна 10 МВ/м?

1.212 Эбонитовая плоскопараллельная пластина помещена в однородное электрическое поле напряженностью E_0 = 1 МВ/м. Границы пластины перпендикулярны силовым линиям. Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на гранях пластины.

1.213 Определить расстояние между пластинами плоского конденсатора, если напряжение между ними U = 200 В. Площадь каждой пластины S = 50 см^2, ее заряд q = 5 нКл. Диэлектриком служит слюда.

1.214 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов U_1 = 500 В. Площадь каждой пластины S = 100 см^2, расстояние между ними d = 1 мм. После отключения конденсатора от источника питания в пространство между пластинами внесли парафин. Определить разность потенциалов U_2 между пластинами после внесения диэлектрика. Определить также емкости конденсатора C_1 и C_2 до и после внесения диэлектрика.

1.215 К пластинам плоского воздушного конденсатора емкостью $C = 10$ пФ приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. После отключения конденсатора от источника питания расстояние между пластинами было увеличено в 3 раза. Определить: 1) разность потенциалов U_2 между пластинами после их раздвижения; 2) работу внешних сил по раздвижению пластин.

1.216 Пластины изолированного плоского конденсатора раздвигаются так, что его емкость изменяется от 90 до 70 пФ. Какая работа совершается при этом, если заряд конденсатора $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ Кл? Поле между пластинами остается однородным.

1.217 Конденсатор емкостью $C_1 = 70$ мкФ заряжен до напряжения $U_1 = 300$ В. К нему параллельно присоединяют незаряженный конденсатор емкостью $C_2 = 200$ мкФ. Какое напряжение установится после их соединения?

1.218 Конденсаторы емкостями $C_1 = 3$ мкФ и $C_2 = 6$ мкФ заряжены до разности потенциалов $\Delta\varphi_1 = 10$ В и $\Delta\varphi_2 = 40$ В соответственно. После зарядки конденсаторы соединили одноименными полюсами. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ между обкладками конденсаторов после их соединения.

1.219 Найти механическую работу, совершённую электрическими силами при повороте ручки настройки конденсатора переменной емкости, подключенного к батарее с ЭДС $\varepsilon = 220$ В, если емкость изменяется от $C_1 = 40$ мФ до $C_2 = 80$ мФ.

1.220 Конденсаторы емкостями $C_1 = 1$ 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.

1.221 Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины к другой, приобретает скорость v = 106 м/с. Расстояние между пластинами $d = 4$ мм. Найти: а) разность потенциалов U между пластинами; б) напряженность электрического поля E внутри конденсатора; в) объемную плотность энергии поля w в конденсаторе.

1.222 Плоский конденсатор имеет в качестве изолирующего слоя стеклянную пластинку, толщина которой d = 1 мм и площадь S = 200 см^2. Конденсатор заряжается до разности потенциалов U = 200 В, после чего отключается от источника напряжения. Определить механическую работу A, которую необходимо совершить, чтобы вынуть пластинку из конденсатора.

1.223 К железному проводу длиной l_1 = 1,6 м и поперечным сечением S_1 = 1 мм^2 параллельно присоединен никелиновый провод длиной l_2 = 1,2 м и поперечным сечением S_2 = 2 мм^2. Определить силу тока в железном проводе, если в никелиновом сила тока I_2 = 0,5 А.

1.224 Сопротивление катушки из медной проволоки 24 Ом, масса проволоки 5 кг. Определить длину и площадь поперечного сечения проволоки.

1.225 Масса мотка медной проволоки 0,1 кг, ее сечение 0,1 мм^2. Определить сопротивление этой проволоки при температуре 393 К.

1.226 Напряжение на концах двух параллельно соединенных сопротивлений по 4 Ом каждый равно 6 В. Если одно из сопротивлений выключить, вольтметр показывает 8 В. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

1.227 По медному проводнику сечением 1 мм^2 течет ток 100 мА. Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника, предполагая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.

1.228 Лампа накаливания потребляет ток, равный 0,6 А. Температура вольфрамовой нити диаметром 0,1 мм равна 2200 ºС. Ток подводится медным проводом сечением 6 мм^2. Определить напряженность электрического поля: 1) в вольфраме; 2) в меди.

1.229 Электрическая плитка мощностью 1 кВт с нихромовой спиралью предназначена для включения в сеть напряжением 220 В. Сколько метров проволоки диаметром 0,5 мм надо взять для изготовления спирали, если температура нити составляет 900 °С?

1.230 Определить ток короткого замыкания источника ЭДС, если при внешнем сопротивлении R_1 = 50 Ом ток в цепи I_1 = 0,2 А, а при сопротивлении R_2 = 110 Ом – I_2 = 0,1 А.

1.231 На цоколе лампочки накаливания с вольфрамовой нитью накала написано: 220 В, 60 Вт. При измерении сопротивления этой лампочки в холодном состоянии оказалось, что оно равно всего 40 Ом. Найти нормальную температуру t накала нити.

1.232 По прямому медному проводу длиной 1000 м и сечением 1 мм^2 проходит ток 4,5 А. Считая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон, найти время, за которое электрон переместится от одного конца провода к другому.

1.233 По медному проводу сечением 0,2 мм^2 проходит ток силой 0,5 А. Определить силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля.

1.234 Определить удельное сопротивление ρ проводника длиной l = 1 м, если при плотности тока j = 106 А/м^2 на его концах поддерживается разность потенциалов U = 5 В.

1.235 Два элемента с ЭДС ε_1 = 1,5 В и ε_2 = 0,8 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 0,3 Ом и r_2 = 0,5 Ом соединены одноименными полюсами. Сопротивление соединительных проводов R = 0,2 Ом. Определить силу тока в цепи.

1.236 При каком сопротивлении R внешней цепи источник с ЭДС ε = 10 В и внутренним сопротивлением r = 20 Ом будет отдавать максимальную мощность? Каково значение P_{max} этой мощности?

1.237 Лифт массой 0,8 т поднимается на высоту 40 м за 0,5 мин. Определить мощность, потребляемую электродвигателем лифта и силу тока в электродвигателе, если напряжение на его зажимах равно 120 В, а КПД – 90 %.

1.238 Два проводника одинаковой длины и одинакового сечения, один из меди, а другой из железа, соединены параллельно. Определить отношение мощностей токов для этих проводников.

1.239 Определить напряженность электрического поля в алюминиевом проводнике объемом $V = 10$ см^3, если при прохождении по нему постоянного тока за время $t = 5$ мин выделилось количество теплоты $Q = 2{,}3$ кДж.

1.240 Медную проволоку длиной 20 м включили последовательно с лампой мощностью 40 Вт, чтобы лампа, рассчитанная на напряжение 120 В, давала нормальный накал при напряжении в сети 220 В. Найти диаметр проволоки.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

1 Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Нормальное ускорение свободного падения	g	9,81 м/с^2
Гравитационная постоянная	G	$6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м^3/(кг · с^2)
Постоянная Авогадро	$N_{\text{А}}$	$6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Элементарный заряд	e	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3{,}0 \cdot 10^8$ м/с
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

2 Некоторые астрономические величины

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

3 Плотность (ρ) твердых тел и жидкостей

Вещество	Плотность, 10^3, кг/м^3	Вещество	Плотность, 10^3, кг/м^3	Вещество	Плотность, 10^3, кг/м^3
Алюминий	2,70	Свинец	11,30	Вода	1,00
Железо	7,88	Серебро	10,50	Глицерин	1,26
Медь	8,93	Цезий	1,90	Керосин	0,80
Никель	8,90	Цинк	7,15	Масло смаз.	0,90

4 Упругие постоянные твердых тел

Вещество	Модуль Юнга E, ГПа	Модуль сдвига G, ГПа
Алюминий	69	24
Вольфрам	380	140
Железо (сталь)	200	76
Медь	98	44

5 Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d, нм	Динамическая вязкость η, мкПа· с	Теплопроводность λ, мВт/(м· К)
Азот	0,38	16,60	24,3
Водород	0,28	8,66	168,0
Воздух	0,27	17,20	24,1
Гелий	0,22	18,90	142,0
Кислород	0,36	19,80	24,4
Пары воды	0,30	8,32	15,8

6 Динамическая вязкость (η) жидкостей при 20 °С

Жидкость	Вязкость, мПа·с
Вода	1,00
Глицерин	1480
Масло касторовое	967
Масло машинное	100

7 Поверхностное натяжение (σ) жидкостей при 20 °С

Жидкость	Поверхностное натяжение, мН/м
Вода	73
Глицерин	62
Мыльная вода	40
Ртуть	500
Спирт	22

8 Диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

Диэлектрик	ε
Масло (трансформаторное)	2,2
Парафин	2,0
Слюда	7,5
Стекло	7,0
Фарфор	5,0
Эбонит	2,7

9 Удельное сопротивление ρ_0 (при 20^0 С) и температурный коэффициент α проводников

Вещество	ρ_0, 10^{-8} Ом·м	α, 10^{-4} $^{\circ}C^{-1}$
Алюминий	3,21	38
Медь	1,70	42,8
Железо	12,0	62
Вольфрам	5,50	51
Нихром	98,0	2,5

10 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

ДЕЛИКАТНАЯ Ирина Олеговна
РОДНЕНКОВ Владимир Георгиевич
БУЛАВКО Лариса Михайловна

ФИЗИКА ДЛЯ ЭКОНОМИСТОВ

Часть 1

Механика. Молекулярная физики. Электричество

Учебно-методическое пособие для студентов экономических специальностей заочного факультета

Редактор *И. И. Эвентов*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Компьютерный набор и верстка – *В. Г. Родненков*

Подписано в печать 25.04.2013 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,63. Тираж 150.
Зак. № Изд. № 161

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
256653, г. Гомель, ул. Кирова, 34