

**ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ  
КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ:  
ТЕРМОДИНАМИКА,  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

МОСКВА  
МФТИ  
2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Кафедра общей физики

**ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ  
КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ:  
ТЕРМОДИНАМИКА,  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

МОСКВА  
МФТИ  
2012

УДК 530.1

С о с т а в и т е л и

*А. В. Гуденко, Ю. Н. Извекова, С. Д. Кузьмичев,  
П. В. Попов, Ю. Н. Филатов*

Р е ц е н з е н т

Кандидат физико-математических наук, доцент *Г. А. Никитаева*

Избранные задачи курса общей физики: термодинамика, электромагнетизм. — М.: МФТИ, 2012. — 32 с.

Представлены задачи различной сложности, отобранные для студентов МФТИ, изучающих физику в рамках направления «Прикладная математика и информатика», «Компьютерная безопасность» и др. Большая часть задач взята из «Сборника задач по общему курсу физики» под ред. В. А. Овчинкина (соответствующие номера отмечены в скобках, задачи к семинарам 1–5 взяты из Т. 1 «Термодинамика», а семинары 6–12 — из Т.2 «Электричество и магнетизм»), при этом в условия некоторых задач были внесены изменения методического характера.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2012

# 1. Основы молекулярно-кинетической теории газов

## 0

**1.1.** Найти молярную массу воздуха. Состав воздуха по массе:  $O_2$  —  $\alpha_1 = 23,1\%$ ;  $N_2$  —  $\alpha_2 = 75,5\%$ ;  $Ar$  —  $\alpha_3 = 1,3\%$ ; другие газы —  $0,1\%$ .

**1.2.** Найти отношение числа молекул водорода  $n_1$ , скорости которых лежат в пределах от 3000 до 3010 м/с, к числу молекул  $n_2$ , имеющих скорости в пределах от 1500 до 1501 м/с, если температура водорода 300 К.

**1.3.** Атмосферное давление на вершине небоскрёба на 8,7% ниже, чем на первом этаже. Оцените высоту здания. Температура окружающего воздуха  $\sim 37^\circ C$ .

## I

**1.4.** Найти коэффициенты объёмного расширения  $\alpha$ , модуля сжатия  $K$  и термический коэффициент давления  $\lambda$  для идеального газа. Выразить связь между этими коэффициентами в общем случае для физически однородного изотропного тела. Рассчитать, какое максимальное давление может возникнуть при нагревании ртути от 0 до  $10^\circ C$ , если для неё  $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ C^{-1}$ ,  $1/K = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$ .

**1.5.** Выразить число молекул  $j$ , ударяющихся о квадратный сантиметр стенки сосуда в одну секунду, через среднюю скорость  $v$  движения газовых молекул, если функция распределения молекул по скоростям изотропна (т.е. не зависит от её направления). Для случая максвелловского распределения по скоростям определить среднюю энергию молекул, ударяющихся о стенку.

**1.6.** Вычислить температуру  $T$  моля одноатомного газа, состоящего из частиц, имеющих два дискретных уровня энергии  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_0$ , и  $\varepsilon_2 = +\varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0$  — известная константа. Разность между числом атомов, находящихся в этих состояниях, равна  $\Delta N$ .

**1.7.** (8.5) Пользуясь формулой Больцмана, найти среднюю потенциальную энергию  $\langle \varepsilon_{\text{пот}} \rangle$  молекулы газа в земной атмосфере, считая последнюю изотермической (с температурой  $T$ ), а поле тяжести однородным. Вычислить теплоёмкость газа  $C$  в этих условиях.

## II

**1.8.** Исходя из распределения Максвелла по проекциям скоростей, найти средний квадрат  $x$ -компоненты скорости молекул газа с молярной массой  $\mu$  при температуре  $T$ . Найти отсюда среднюю кинетическую

энергию, приходящуюся на одну степень свободы поступательного движения молекулы газа.

**1.9.** Записать функцию распределения молекул водорода по энергиям при вращательном движении вокруг фиксированной оси, проходящей через центр её масс и перпендикулярной оси молекулы, и рассчитать среднюю энергию  $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle$ , приходящуюся на вращательную степень свободы. Исходя из этого, определить суммарную энергию вращательного движения водорода, находящегося при давлении  $P = 10^5$  Па в объёме  $V = 1$  л.

**1.10.** (8.10) Вблизи поверхности Земли концентрация аргона  $^{40}\text{Ar}$  составляет 0,9%. Оценить, какой была бы концентрация аргона на высоте, где давление воздуха падает в 10 раз, если бы атмосфера была бы равновесной и изотермической.

### III

**1.11.** (8.13) Для определения числа Авогадро Ж.Перрен измерял распределение по высоте шарообразных частиц гуммигута, взвешенных в воде. Он нашёл, что отношение  $\alpha$  числа частиц в слоях отстоящих друг от друга на расстоянии  $\ell = 30$  мкм равно 2,08. Плотности частиц  $\rho = 1,194$  г/см<sup>3</sup>, воды  $\rho_0 = 1$  г/см<sup>3</sup>. Радиусы частиц  $r = 0,212$  мкм. На основании этих данных вычислить число Авогадро  $N_A$ . Температура воды  $t = 18^\circ\text{C}$ .

## 2. Первое начало термодинамики

### 0

**2.1.** (1.46) Идеальный газ сжимается по закону  $P^2V = \text{const}$ . Как температура газа зависит от объёма в этом процессе? Какова его молярная теплоёмкость в этом процессе? Нагревается или охлаждается газ?

**2.2.** Температура воздуха равна 273 К. Найти изменение скорости звука при изменении температуры на 1 К.

**2.3.** Какое количество тепла  $Q$  отдаёт моль одноатомного идеального газа при его изобарическом обратимом охлаждении, если на сжатие газа в ходе этого процесса затрачена работа  $A = 10$  Дж?

### I

**2.4.** Рассчитать молярную теплоёмкость гипотетического газа, полагая, что молекула такого газа представляет собой а) бусинку, которая

может двигаться только вдоль жесткой бесконечно длинной спицы (одномерный газ); б) две бусинки, связанные между собой пружиной, которые могут двигаться только вдоль жесткой бесконечно длинной спицы; в) бусинку, которая может двигаться в плоскости (двумерный газ).

**2.5.** (1.38) Политропическим процессом называется процесс, происходящий с постоянной теплоемкостью  $C$ . Кривая, изображающая политропический процесс, называется политропой. Найти уравнение политропы для идеального газа, теплоемкость  $C_v$  которого не зависит от температуры. Рассмотреть частные случаи: 1)  $C = C_v$ ; 2)  $C = C_p$ ; 3)  $C = 0$ ; 4)  $C = \infty$ .

**2.6.** (2.12) Найти конечную температуру  $T_2$  и верхний предел скорости  $v$  стационарного потока перегретого водяного пара, вытекающего через сопла в атмосферу из камеры, где он имел температуру  $T_1 = 600$  К и находился под давлением  $P_1 = 5$  атм, если давление наружного воздуха равно  $P_2 = 1$  атм. Перегретый пар считать идеальным газом с молярной теплоемкостью  $C_p = 4R$ .

**2.7.** (1.58) Теплоизолированный сосуд разделен непроницаемой перегородкой на 2 равные части. В одну часть помещен идеальный газ, а другая откачана до высокого вакуума. Затем перегородку убирают, и газ заполняет весь объем сосуда. После этого газ нагревают, заставляя его последовательно совершать два процесса: 1) процесс при постоянном давлении, в результате которого объем газа увеличивается в 4 раза; 2) процесс при постоянном объеме в результате которого восстанавливается исходное давление газа. В обоих процессах газу сообщается одинаковое количество тепла. Определить показатель адиабаты  $\gamma$ .

## II

**2.8.** (1.86) Теплоизолированный цилиндр разделен тонкой неподвижной, теплопроводящей перегородкой АВ на две части, в одной из которых находится моль газообразного водорода, а в другой — моль газообразного гелия (см. рис. 1). Подвижный теплонепроницаемый поршень CD находится под постоянным внешним давлением  $P$ . В начальный момент оба газа находятся в равновесном состоянии, причем температуры водорода и гелия различны, а давление гелия равно внешнему давлению  $P$ . Затем начинается неравновесный процесс выравнивания температур газов, в ходе которого поршень перемещается вправо. К моменту, когда температуры газов выровняются и установится равновесие, система совершит против внешнего

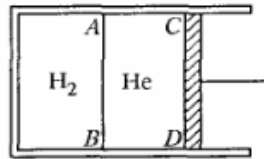


Рис. 1

давления работу  $A = 42$  Дж. Определить изменение температуры водорода к этому моменту времени.

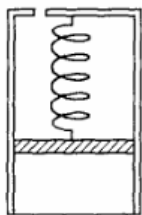


Рис. 2

**2.9.** (1.54) Моль идеального газа нагревают в цилиндре под поршнем, удерживаемом в положении равновесия пружиной, подчиняющейся закону Гука (см. рис. 2). Стенки цилиндра и поршень адиабатические, а дно проводит тепло. Начальный объем газа  $V_0$ , при котором пружина не деформирована, подобран так, что  $P_0 S^2 = kV_0$ , где  $P_0$  — наружное атмосферное давление,  $S$  — площадь поршня,  $k$  — коэффициент упругости пружины. Найти теплоемкость газа для этого процесса.

**2.10.** (2.23) Если в процессе адиабатического истечения газа через короткую трубку скорость газа достигнет скорости звука, то в потоке могут возникнуть ударные волны. При каком отношении давлений на выходе и входе трубки такое возможно? Газ считать одноатомным, вязкостью пренебречь.

### III

**2.11.** (2.13) Допустим, что температура горения химического горючего для ракетных двигателей  $T = 3000$  К, средняя молярная масса продуктов горения  $\mu = 30$  г/моль и что истечение продуктов горения происходит в вакуум адиабатически. Найти, во сколько раз стартовая масса одноступенчатой ракеты  $M_0$  должна превышать ее конечную массу  $M$ , чтобы ракета могла достичь первой космической скорости  $v = 8$  км/с. Молярную теплоемкость продуктов горения ориентировочно принять равной  $C_p = 8$  кал/(моль·К). При вычислении скорости ракеты силу тяжести и трения о воздух не учитывать.

## 3. Второе начало термодинамики

### 0

**3.1.** (4.8) Тепловые машины с произвольным веществом в качестве рабочего тела совершают обратимые термодинамические циклы, представленные на рис. 3. Выразить КПД этих циклов через максимальную  $T_1$  и минимальную  $T_2$  температуры.

**3.2.** Вычислить приращение энтропии одного моля азота при нагревании его от  $100$  до  $200^\circ\text{C}$ . а) при постоянном объеме; б) при постоянном давлении.

**3.3.** Теплоизолированный сосуд разделен на две равные части перегородкой, в которой имеется закрывающееся отверстие. В одной половине содержится  $10$  г водорода, вторая половина откачана до высокого

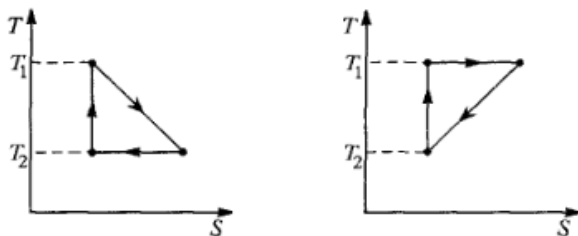


Рис. 3

вакуума. Отверстие в перегородке открывают, и газ заполняет весь объём. Считая газ идеальным, найти изменение его энтропии.

## I

**3.4.** В холодильнике сломался выключатель, и внутренняя лампочка продолжала гореть при закрытой двери. Нарисовать цикл работы холодильника в координатах  $(S, T)$  до и после поломки, считая, что вся мощность лампочки ( $N = 25$  Вт) переходит в тепло. Определите, на сколько изменилась потребляемая холодильником мощность. Обычно при комнатной температуре  $t_2 = 22^\circ\text{C}$  внутри холодильника поддерживается температура  $t_1 = 2^\circ\text{C}$ . Холодильник считайте идеальным.

**3.5.** Два одинаковых идеальных газа с одинаковым давлением  $P$  по одному моллю каждого, но с разными температурами  $T_1$  и  $T_2$ , находятся в сосудах с объёмами  $V_1$  и  $V_2$ . Сосуды соединяются. Найти изменение энтропии после установления равновесия.

**3.6.** (4.61) Найти суммарное изменение энтропии  $\Delta S$  (воды и железа) при погружении 100 г железа, нагретого до  $300^\circ\text{C}$ , в воду при температуре  $15^\circ\text{C}$ . Удельная теплоёмкость железа  $c = 0,11$  кал/(г · К).

**3.7.** (3.37) Какую минимальную работу должен совершить двигатель идеального холодильника, чтобы, работая в среде, имеющей температуру  $t_c$ , охладить  $\nu$  молей воды до  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  и превратить её в лёд?

## II

**3.8.** Найти увеличение энтропии идеального газа при его расширении в пустоту из объёма  $V_1 = V$  до объёма  $V_2 = 2V$ , используя термодинамическое и статистическое (формулу Больцмана) определение энтропии. Сосуд, в котором происходит расширение, теплоизолирован.

**3.9.** (4.45) Сосуд с теплонепроницаемыми стенками, имеющий объём  $2V$ , разделён теплопроводящим поршнем так, что отношение объёмов  $V_1/V_2 = n$ . В каждой из частей сосуда находится по одному моллю иде-



ального газа, теплоёмкость  $C_V$  которого не зависит от температуры. Поршень отпускают, и он начинает колебания, которые постепенно затухают из-за внутреннего трения в газе. Пренебрегая трением поршня о стенки сосуда, найти изменение энтропии газа в этом процессе. Начальные температуры газа в обеих частях сосуда считать одинаковыми.

**3.10.** В зимний день температура воздуха на улице, сначала равная  $-9^\circ\text{C}$ , понизилась ещё на  $10^\circ\text{C}$ . Для обогрева комнаты используется тепловой насос, работающий между комнатой и улицей. Считая тепловой насос идеальной машиной, определить, во сколько раз при этом изменились затраты энергии для поддержания температуры в комнате, равной  $21^\circ\text{C}$ .

### III

**3.11.** С помощью бензиновой горелки в помещении поддерживается температура  $t_1 = -3^\circ\text{C}$  при температуре на улице  $t_2 = -23^\circ\text{C}$ . Предполагается использовать бензин в движке с КПД  $\eta = 0,4$ , а с помощью полученной механической энергии запустить тепловой насос, перекачивающий по холодильному циклу тепло с улицы в комнату. Какой должна быть в этом случае температура в помещении  $t_x$ ? Движок находится вне помещения.

**3.12.** Кубик воды ( $V = 1 \text{ см}^3$ ) помещён в воздух при нормальных условиях. Найти, во сколько раз вероятность состояния, в котором температура кубика отличается от температуры воздуха на  $\Delta T$ , меньше вероятности равновесного состояния. Исходя из этого оцените среднеквадратичное отклонение (флуктуацию) температуры кубика от равновесного значения.

## 4. Реальные газы. Фазовые переходы

### 0

**4.1.** (11.6) Уксусная кислота при атмосферном давлении плавится при температуре  $16,6^\circ\text{C}$ . Разность удельных объёмов жидкой и твёрдой фаз кислоты равна  $0,16 \text{ см}^3/\text{г}$ . При изменении давления на  $40 \text{ атм}$  температура плавления изменяется на  $1 \text{ К}$ . Найти удельную теплоту плавления уксусной кислоты.

**4.2.** (6.5) Найти критическую плотность воды, если критическое давление для воды равно  $P_{\text{кр}} = 218,3 \text{ атм}$ , а критическая температура  $T_{\text{кр}} = 647,3 \text{ К}$ , предполагая, что вода подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса.

**4.3.** Критическая температура для углекислого газа 304 К. При какой температуре углекислый газ в опыте Джоуля—Томсона должен охлаждаться?

## I

**4.4.** (6.62) Найти КПД цикла, состоящего из адиабаты, изотермы (температура  $T_1$ , объём уменьшается от  $V_2$  до  $V_1$ ) и изохоры (объём  $V_1$ , температура увеличивается от  $T_1$  до  $T_2$ ). Рабочим веществом является 1 моль газа Ван-дер-Ваальса, константы  $a$  и  $b$  которого известны, а теплоёмкость  $C_V$  не зависит от температуры.

**4.5.** Показать, что газ, подчиняющийся уравнению Ван-дер-Ваальса, в опыте Джоуля—Томсона 1) всегда нагревается, если  $a = 0$ , и 2) всегда охлаждается, если  $b = 0$ . Определить изменение температуры при расширении одного моля газа от объёма  $V_0$  до объёма  $V$  в обоих случаях. Начальная температура равна  $T_0$ , теплоёмкость  $C_V$  газа считать известной. В случае 1) газ считать достаточно разреженным, так что  $V, V_0 \gg b$ .

**4.6.** (11.1) В закрытом сосуде при  $0^\circ\text{C}$  находится один моль воды. Какое количество тепла надо затратить, чтобы повысить температуру системы до  $100^\circ\text{C}$  и чтобы при этом вся вода превратилась в насыщенный пар? Удельная теплота испарения воды при  $100^\circ\text{C}$  равна  $\lambda = 539$  кал/г.

**4.7.** (11.13) Гейзеры могут рассматриваться как большие подземные резервуары, наполненные грунтовой водой и прогреваемые подземным теплом. Выход из них на поверхность осуществляется через узкий канал, который в спокойный период заполнен водой. Считая, что активный период наступает, когда закипает вода в подземном резервуаре, и что во время извержения гейзера канал заполнен только паром, который и выбрасывается наружу, оценить, какую часть воды теряет резервуар гейзера во время одного извержения. Глубина канала  $h = 90$  м. Удельная теплота парообразования  $\lambda = 2260$  Дж/г.

## II

**4.8.** Один моль углекислого газа, занимавший при температуре  $T = 400$  К объём  $V_1 = 0,5$  л, расширяется изотермически до объёма  $V_2 = 2V_1$ . Определить работу при расширении, изменение внутренней энергии и количество поглощённой теплоты, предполагая, что газ подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса с параметрами  $a = 0,36$  Па·м<sup>6</sup>/моль<sup>2</sup> и  $b = 4,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/моль.

**4.9.** (11.10) Найти температуру приготовления пищи в скороварке, если диаметр отверстия предохранительного скороварки  $d = 5$  мм, а

масса грузика, закрывающего клапан,  $m = 60$  г. Теплоту парообразования для воды принять равной  $\lambda = 2260$  кДж/кг. Пар считать идеальным газом.

**4.10.** Определить температуру кипения воды  $t_k$  на высоте  $H$  от поверхности Земли. Атмосферу предполагать изотермической с температурой  $t_0$ . Давление воздуха у поверхности Земли  $P_0 = 1$  атм. Рассчитайте численное значение температуры кипения для  $H = 7000$  м, и  $t_0 = -13^\circ\text{C}$ .

### III

**4.11.** (11.29) Насыщенный водяной пар при температуре  $T = 373$  К адиабатически расширяется, при этом его температура падает на  $\Delta T = 1$  К. Считая, что равновесие между жидкой и газообразной фазами успевает установиться, определить, какая часть водяного пара при этом конденсируется. Пар считать идеальным газом.

## 5. Процессы переноса

### 0

**5.1.** Расстояние между стенками сосуда Дьюара равно  $\ell = 8$  мм. Начиная с какого давления  $P$ , теплопроводность воздуха, находящегося между стенками сосуда, начнет уменьшаться при откачке? Температура воздуха  $T = 290$  К. Диаметр молекул воздуха  $d = 3 \cdot 10^{-8}$  см. Воздух считать идеальным газом.

**5.2.** Одна из деревянных стен дома имеет общую площадь  $10$  м<sup>2</sup>. В стене есть окно (один слой стекла площадью  $2$  м<sup>2</sup>). Толщина стены равна  $10$  см, теплопроводность дерева  $0,1$  Вт/(м · К). Толщина оконного стекла составляет  $4$  мм, теплопроводность стекла  $0,7$  Вт/(м · К). Температура внутри дома  $18^\circ\text{C}$ , а снаружи  $5^\circ\text{C}$ . Какова скорость потери тепла через эту стену? Считать, что температура в дереве и стекле изменяется линейно.

**5.3.** Оцените среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  молекулы смеси кислорода в азоте (концентрация кислорода много меньше концентрации азота) при нормальных условиях, если коэффициент взаимной диффузии этих газов в таких условиях равен  $D = 0,2$  см<sup>2</sup>/с.

### I

**5.4.** Оцените, на какое среднее расстояние от своего исходного положения удалится за  $t = 10$  с молекула кислорода при нормальных условиях.

**5.5.** В цилиндрическом сосуде постоянного объёма находится идеальный газ при температуре  $T_0$  и давлении  $P_0$ . Боковые стенки сосуда — теплоизолирующие. Днище сосуда нагревают до температуры  $T = 4T_0$ , а температуру крышки поддерживают равной  $T_0$ . Определите установившееся давление в сосуде. Коэффициент теплопроводности зависит от температуры.

**5.6.** Топливный стержень атомного реактора представляет собой длинный цилиндр радиуса  $R = 3$  см. Через несколько часов после остановки цепной реакции в стержне устанавливается стационарное тепловыделение  $q = 20$  Вт/см<sup>3</sup> за счёт реакции распада. Стержень помещён в воду, температура воды  $T_0 = 373$  К, теплопроводность урана  $\kappa = 4$  Вт/(см·К). Найти температуру в центре стержня. Тепловыделение считать однородным по объёму.

**5.7.** Камера объёмом  $V = 100$  л откачивается при комнатной температуре с помощью идеального насоса (т. е. улавливающего весь попадающий в него газ) через трубу радиуса  $r = 2$  см, длины  $L = 1$  м. Оценить, сколько будет длиться откачка камеры: а) от давления  $P_1 = 1$  атм до  $P_2 = 10^{-3}$  атм, б) от  $P_3 = 10^{-3}$  торр до  $P_4 = 10^{-6}$  торр. Коэффициент вязкости воздуха считать равным  $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

## II

**5.8.** (10.98) В микроскоп рассматривается тонкий слой крови. Какое время потребуется, чтобы заметить броуновское смещение эритроцитов (красных кровяных телец), если минимальное расстояние, которое можно зафиксировать, составляет  $\ell = 10^{-6}$  м? Вязкость крови  $\eta = 4,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с, эритроцит считать шариком с радиусом  $r = 3 \cdot 10^{-6}$  м. Температура  $t = 27^\circ\text{C}$ . (Указание: для расчёта подвижности эритроцита применить формулу Стокса для силы лобового сопротивления).

**5.9.** (10.64) Вязкость аргона (относительная атомная масса  $A = 40$ ) при  $0^\circ\text{C}$  равна  $\eta = 21 \cdot 10^{-5}$  дин·с/см<sup>2</sup>. Вычислите следующие величины для аргона при нормальных условиях: 1) среднюю скорость теплового движения атомов, 2) среднюю длину свободного пробега атома, 3) среднее число  $\nu$  столкновений атомов в 1 см<sup>3</sup> за 1 с, 4) газокинетическое эффективное сечение атома  $\sigma$ , 5) газокинетический радиус атома аргона  $r$ .

**5.10.** (10.77) Два сосуда одинакового объёма соединены трубками. Диаметр одной из трубок очень велик, а другой очень мал по сравнению с длиной свободного пробега молекул газа, находящегося в сосуде. Первый сосуд поддерживается при постоянной температуре  $T_1 = 800$  К, а второй — при постоянной температуре  $T_2 = 200$  К. В каком направлении будет перетекать газ по узкой трубке, если перекрыть краном

широкую? Какая масса  $m$  газа перейдёт при этом из одного сосуда в другой, если общая масса газа в обоих сосудах равна  $M$ ?

### III

**5.11.** (10.106) Найти время испарения воды из вертикально расположенной трубки длиной  $l = 10$  см, запаянной с одного конца. Температура воды и окружающего воздуха  $t = 27^\circ\text{C}$ . Первоначально вода заполняла трубку наполовину; относительная влажность воздуха 50%. Давление насыщенных паров при температуре  $t = 27^\circ\text{C}$  составляет  $P = 20$  торр. Длину свободного пробега  $\lambda$  в системе воздух-пар считать равной  $10^{-5}$  см. Пар у поверхности считать насыщенным, капиллярными явлениями пренебречь. Процесс испарения считать достаточно медленным, так что в каждый момент времени успевает установиться стационарное распределение потока паров воды вдоль пробирки (квазистационарное приближение).

## 6. Электрическое поле. Потенциал

### 0

**6.1.** Используя формулу для напряжённости поля точечного диполя с дипольным моментом  $\vec{p}$ , найдите напряжённость поля на оси диполя ( $\varphi = 0$ ) и в перпендикулярном направлении ( $\varphi = \pi/2$ ).

**6.2.** Незаряженный проводящий шар вносится в электрическое поле с известным распределением потенциала  $\varphi(\vec{r})$ . Каким будет потенциал шара?

**6.3.** В опытах Резерфорда золотая фольга бомбардировалась  $\alpha$ -частицами  ${}^4_2\text{He}$  с кинетической энергией  $W = 5$  МэВ. На какое минимальное расстояние может приблизиться  $\alpha$ -частица к неподвижному ядру золота  ${}^{197}_{79}\text{Au}$ ?  $e = 4,80 \cdot 10^{-10}$  ед. СГСЭ;  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг.

**6.4.** Напряжённость электрического поля Земли  $E_0 = 130$  В/м, причём вектор  $\vec{E}_0 \uparrow\uparrow \vec{g}$ . Какой заряд приобретёт горизонтально расположенный короткозамкнутый плоский конденсатор с площадью пластин  $S = 1 \text{ м}^2$ ?

### I

**6.5.** Найти силу взаимодействия между а) точечным зарядом  $q$  и точечным диполем, дипольный момент  $\vec{p}$  которого направлен вдоль соединяющих их прямой; б) между двумя точечными диполями с дипольными моментами  $\vec{p}_1$  и  $\vec{p}_2$ , направленными перпендикулярно соединяющей их прямой. Расстояние между частицами равно  $R$ .

**6.6.** Диск радиусом  $R$  заряжен равномерно с поверхностной плотностью  $\sigma$ . Определить напряжённость и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии  $z$  от диска на перпендикуляре, проходящем через центр диска. Как ведёт себя потенциал и напряжённость при  $z \gg R$ ?

**6.7.** В однородное электрическое поле  $\vec{E}_0$  вносится незаряженный проводящий шар. Найдите распределение поля вне и внутри шара и распределение поверхностной плотности зарядов  $\sigma(\theta)$  на нём.

**6.8.** Заряд  $+q$  находится на расстоянии  $h$  от заземлённой проводящей пластины (размеры пластины много больше  $h$ ). С какой силой заряд притягивается к пластине и какова плотность индуцированных на поверхности зарядов?

### II

**6.9.** (1.17) В модели атома Томсона предполагалось, что положительный заряд  $e$  распределён внутри шара радиусом  $R = 10^{-8}$  см. Как должна зависеть от радиуса плотность положительного заряда, чтобы

электрон (точечная масса с зарядом  $-e$ ), помещённый внутри шара, совершал гармонические колебания? Нарисуйте зависимость напряжённости поля  $E(r)$  и потенциала  $\varphi(r)$  положительного заряда. Заряды механически друг на друга не действуют. Магнитным полем движущегося заряда пренебречь. Найти частоту колебаний электрона.

**6.10.** (2.5) Вычислить распределение потенциала в плоском конденсаторе толщиной  $d$ , если одна обкладка заземлена, другая находится при потенциале  $\varphi_0$ , а в пространстве между ними распределён заряд с постоянной объёмной плотностью  $\rho$ .

**6.11.** (2.15) Найти силу притяжения точечного электрического диполя с дипольным моментом  $p = 4 \cdot 10^{-10}$  Кл·см к бесконечной металлической пластине, ближайшая точка которой находится от диполя на расстоянии  $L_0 = 1$  см. Ось диполя перпендикулярна к пластине. Определить также работу, которую надо затратить, чтобы отодвинуть диполь от поверхности пластины с расстояния  $L_0 = 1$  см до расстояния  $L = 2$  см.

### III

**6.12.** Оценить силу взаимодействия  $F$  между двумя маленькими металлическими шариками радиуса  $R$ , один из которых имеет заряд  $q$ , а другой не заряжен. Расстояние между шариками  $d \gg R$ .

## 7. Электрическое поле в веществе

### 0

**7.1.** Нарисовать силовые линии  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  для тонкого диэлектрического цилиндра с замороженной поляризацией  $\vec{P}$ , ориентированной вдоль образующей.

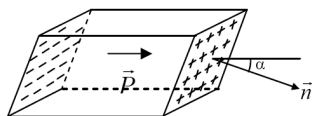


Рис. 4

**7.2.** (3.22) В центре диэлектрического шара радиусом  $R$  с проницаемостью  $\varepsilon_1$  помещен точечный заряд  $q$ . Шар окружен безграничным диэлектриком с проницаемостью  $\varepsilon_2$ . Определить поверхностную плотность поляризационных зарядов на границе раздела диэлектриков.

**7.3.** Найдите плотность поляризационных зарядов на торцах однородно поляризованного параллелепипеда (см. рис. 4).

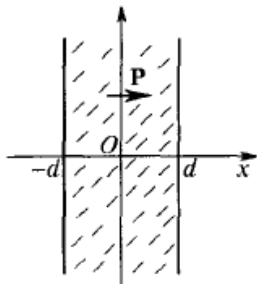


Рис. 5

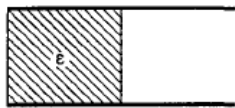


Рис. 6

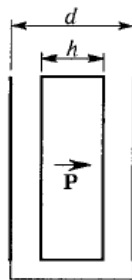


Рис. 7

## I

**7.4.** Проводящий шар радиуса  $R_0$  заряжен зарядом  $q$  и окружён шаровым слоем из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , вплотную примыкающим к поверхности проводящего шара. Внешний радиус шарового слоя равен  $R$ . Определите напряжённость электрического поля  $E$  и индукцию  $D$  в диэлектрике и вне его как функции расстояния  $r$  до центра шара. Определите также потенциал шара  $\varphi_{\text{ш}}$  и плотность  $\sigma_{\text{пол}}$  поляризационных зарядов на внешней поверхности шарового слоя.

**7.5.** (3.1) На сколько отличается от единицы диэлектрическая постоянная  $\epsilon$  идеального газа, состоящего из проводящих шариков радиусом  $r$ . Концентрация шариков  $n$  мала, так что  $r^3 n \ll 1$ .

**7.6.** (3.13) Пластина пьезодиэлектрика вследствие неоднородной деформации поляризована так, что поляризация ее в середине равна  $P_0$  и спадает к краям по закону  $P = P_0(1 - x^2/d^2)$ , где  $x$  отсчитывается от середины пластины, а  $d$  — ее полутолщина (см. рис. 5). Вектор поляризации направлен вдоль оси  $x$ . Определить напряженность электрического поля внутри и вне пластинки, а также разность потенциалов между ее боковыми поверхностями. Краевыми эффектами пренебречь.

**7.7.** (3.30) Прокладка из сегнетоэлектрика ( $\epsilon = 200$ ) имеет толщину, равную зазору между пластинками плоского конденсатора (см. рис. 6). Площадь пластин плоского конденсатора  $S_1 = 1 \text{ м}^2$ . Какова должна быть площадь  $S_2$  основания прокладки для того, чтобы в объеме, занимаемом прокладкой, индукция сделалась в 40 раз больше, чем до ее введения? Конденсатор изолирован.

## II

**7.8.** (3.26) Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого ли-



нежно меняется от значения  $\varepsilon_1$  у одной пластины до значения  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$  у другой. Расстояние между пластинами  $d$ , площадь каждой из них равна  $S$ . Найти емкость  $C$  конденсатора.

**7.9.** (3.19) Внутри плоского конденсатора (см. рис. 7), обкладки которого соединены между собой, помещена диэлектрическая пластина толщиной  $h$  с «замороженной» однородной поляризацией ( $\vec{P} = \text{const}$ ). Вектор поляризации  $\vec{P}$  перпендикулярен боковым граням пластины. Определить напряженность поля и электрическую индукцию внутри и вне пластины. Расстояние между обкладками конденсатора равно  $d$ .

**7.10.** Напряженность электрического поля, измеренная в тонком канале, просверленном перпендикулярно поверхностям неоднородно поляризованной пластинки толщиной  $2d$ , оказалась равна  $\vec{E}(x) = \vec{E}_0 \cdot (x/d)^3$ . Найдите распределение поляризационных зарядов в пластинке, вектор поляризации, а также поля  $\vec{E}(x)$  и  $\vec{D}(x)$  внутри и вне пластинки. Электрическое поле  $\vec{E}(x)$  параллельно оси  $x$ .

### III

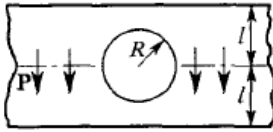


Рис. 8

**7.11.** (3.14) В тонкой длинной рейке из диэлектрика создана однородная «замороженная» поляризация, так что вектор поляризации  $\vec{P}$  параллелен поверхности рейки (см. рис. 8). Какова напряженность электрического поля в центре круглого отверстия радиусом  $R$ , вырезанного в такой рейке? Ширина рейки  $2l$ , ее толщина  $h \ll R$ .

## 8. Энергия электрического поля. Постоянный ток

### 0

**8.1.** Какую работу необходимо совершить, чтобы перегруппировать три одинаковых точечных заряда  $q$  расположенных вдоль линии на одинаковом расстоянии  $a$  друг от друга в равносторонний треугольник со стороной  $a$ .

**8.2.** Поверхностная плотность заряда на пластинах плоского конденсатора, заполненного диэлектриком с проницаемостью  $\varepsilon$ , равна  $\sigma$ . Расстояние между обкладками конденсатора равно  $d$ . 1) Определите объёмную плотность  $w_3$  электрической энергии в конденсаторе. 2) Определите силу, действующую на единицу площади обкладок.

**8.3.** (4.3) Три гальванических элемента с ЭДС  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$  и внутренними сопротивлениями  $r_1, r_2, r_3$  соединены по схеме, указанной на рис. 9. Сопротивления соединяющих проводов пренебрежимо малы. Какое напряжение  $U$  будет показывать вольтметр, включенный как показано на рисунке?

## I

**8.4.** Вычислить электростатическую энергию шара, заряд  $Q$  которого равномерно распределён а) по его поверхности, б) по его объёму. Для случая а) определите также давление изнутри на поверхности сферы, обусловленное взаимодействием зарядов.

**8.5.** (3.63) Плоский конденсатор с квадратными пластинами (расстояние между пластинами  $d$ , площадь пластин  $S$ ) заряжен до разности потенциалов  $V$  и отсоединен от источника напряжения. После этого в конденсатор вдвинута до половины широкая пластина с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Толщина пластины равна  $d$ . Найти силу, с которой пластина вытягивается в конденсатор.

**8.6.** (4.32) Заземление концов телеграфной линии осуществлено посредством глубоко зарытых в землю металлических шаров радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . Удельная проводимость почвы вблизи них равна  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Найти сопротивление  $R$  земли между шарами.

**8.7.** (4.27) Пространство между двумя концентрическими сферами заполнено диэлектриком, проводимость которого зависит только от расстояния до сфер. Найти закон изменения удельной проводимости  $\lambda(r)$ , если объёмная плотность джоулевых потерь при прохождении тока одинакова во всех точках.

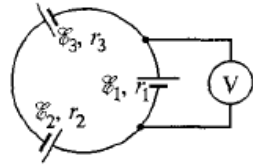


Рис. 9

## II

**8.8.** (3.44) Считая, что масса электрона определяется из соотношения  $W = mc^2$ , где  $W$  — электростатическая энергия заряда электрона, найти значение радиуса электрона при следующих предположениях: 1) весь заряд электрона распределен по всему его объёму с постоянной плотностью; 2) весь заряд электрона распределен по его поверхности.

**8.9.** Сферический конденсатор ёмкостью  $C = 20$  см заполнен однородной слабо проводящей средой с проводимостью  $\lambda = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Определите электрическое сопротивление между обкладками.

**8.10.** (4.31) По сети длиной 5 км необходимо передать энергию от источника с напряжением  $U = 110$  В, имеющего мощность 5 кВт. Какого

минимального диаметра  $D$  должен быть медный провод, чтобы потери энергии в сети не превышали 10% от мощности источника? Удельное сопротивление меди  $\rho = 0,017 \cdot 10^{-4}$  Ом·см.

### III

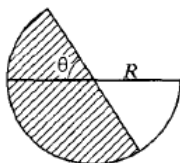


Рис. 10

**8.11.** (3.67) Конденсатор переменной емкости состоит из двух неподвижных металлических пластин, расположены на расстоянии  $d$  друг от друга, и подвижной диэлектрической пластины, которая может поворачиваться и входит в зазор между металлическими пластинами (рис. 10). Все пластины имеют форму полукруга радиусом  $R$ , причем зазоры между пластинами малы. Пренебрегая краевыми эффектами, найти момент сил  $M$ , действующий

на диэлектрическую пластину, когда она выведена из положения равновесия. Конденсатор заряжен до разности потенциалов  $V$ , диэлектрическая проницаемость подвижной пластины равна  $\epsilon$ .

## 9. Магнитное поле в вакууме

### 0

**9.1.** На какой угол  $\alpha$  от вертикали отклонятся тонкие нити, на которых горизонтально подвешен проводник длиной  $\ell$  и массой  $m$ , если по нему пустить ток  $I$  при наличии однородного вертикального магнитного поля с индукцией  $B$ ?

**9.2.** (5.3) Электрический ток силой  $I$  протекает по находящемуся в вакууме проводу, изогнутому так, как показано на рис. 11. Найдите значение индукции магнитного поля в центре окружности радиусом  $R$ .

**9.3.** (5.30) На один сердечник намотаны две катушки. Индуктивности катушек в отдельности равны  $L_1 = 0,5$  Гн,  $L_2 = 0,7$  Гн. Чему равна взаимная индуктивность  $M$ ? Считать, что рассеяния магнитного потока нет.

### I

**9.4.** (5.5) Найдите индукцию  $B$  магнитного поля на оси соленоида в точке  $A$ , из которой диаметры торцов видны под углами  $2\alpha$  и  $2\beta$  (см. рис. 12). Соленоид состоит из  $N$  витков, равномерно намотанных на длине  $\ell$ , и по нему течет ток силой  $I$ .

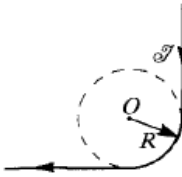


Рис. 11

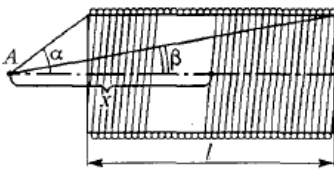


Рис. 12

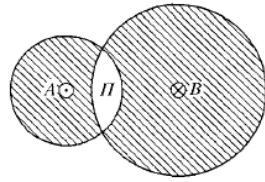


Рис. 13

**9.5.** По кольцу радиуса  $R$  течет ток  $I$ . Найти вектор магнитного поля на оси кольца на расстоянии  $r$  от его плоскости. Рассмотреть предельный случай ( $r \gg R$ ) и, сравнив с выражением для поля точечного магнитного диполя, найти магнитный момент кольца  $\mu$ . Определить также минимальную работу внешних сил, которую необходимо совершить, чтобы развернуть кольцо на  $180^\circ$ , если его поместить в поле  $B_0$ , перпендикулярное плоскости кольца (ток в кольце поддерживается неизменным).

**9.6.** (5.23) Под двумя бесконечно длинными прямолинейным проводникам, сделанным из немагнитного материала и изолированным друг от друга, текут в противоположных направлениях токи с одной и той же плотностью  $j = 1000 \text{ А/см}^2$ . Проводники ограничены цилиндрическими поверхностями (см. рис. 13), поперечные сечения проводников заштрихованы). Найти величину и направление магнитного поля в полости II. Токи в проводах направлены противоположно. Расстояние между осями цилиндров  $AB = d = 5 \text{ см}$ .

**9.7.** (5.27) Коаксиальный кабель состоит из толстого внутреннего провода радиусом  $r$  и тонкой внешней оболочки радиусом  $R$ . Найти индуктивность кабеля на единицу длины.

## II

**9.8.** (5.21) Вдоль плазменного цилиндра радиусом  $a$  с параболическим распределением проводимости  $\lambda = \lambda_0 (1 - r^2/a^2)$  течет постоянный ток  $I$ . Найти зависимость магнитного поля  $B(r)$  внутри и вне цилиндра в зависимости от расстояния  $r$  от оси цилиндра.

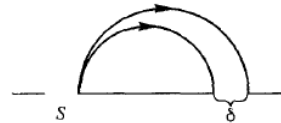


Рис. 14

**9.9.** (5.12) Длинный тонкий многовитковый соленоид с поверхностной плотностью тока  $i$  и площадью поперечного сечения  $S = \pi r^2$  согнут так, что его ось образует половину окружности радиусом  $R$ . Найдите величину индукции магнитного поля в центре этой окружности.

**9.10.** (8.17) В установке по разделению изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  пучок однократно ионизированных ускоренных ионов урана с энергией  $W = 5 \text{ кэВ}$  попадает от источника через щель  $S$  (см. рис. 14) в однородное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен к плоскости рисунка. В магнитном поле ионы разных масс движутся по различным окружностям и, совершив полуоборот, попадают в приемники. Конструкция последних должна быть такова, чтобы расстояние между пучками  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  на выходе было не меньше  $\delta = 5 \text{ мм}$ . Какова должна быть индукция магнитного поля, удовлетворяющая этому условию? Найти также время  $t$ , необходимое для разделения  $M = 1 \text{ кг}$  природного урана, если ионный ток, создаваемый источником,  $I = 5 \text{ мА}$ . Массы протона и нейтрона считать одинаковыми и равными  $m_0 = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ .

### III

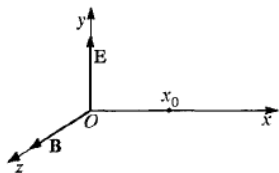


Рис. 15

**9.11.** (8.34) В скрещенных однородных полях  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ) из некоторой точки  $x_0$  разлетаются электроны с одинаковыми скоростями  $v \ll c$ , лежащими в плоскости  $Oxy$  (см. рис. 15). Считая  $E \ll B$  (СГСЭ) и пренебрегая взаимодействием электронов друг с другом, найти, на каком расстоянии  $\ell$  и через какое время  $T$  они снова соберутся в

одну точку. *Указание:* перейти в систему отсчета, в которой электрическое поле равно нулю.

**9.12.** (5.34) В длинном соленоиде с плотностью намотки  $n$  [витков/см] вдали от его концов расположен намагниченный стержень, имеющий магнитный момент  $\mu$ , ориентированный вдоль оси соленоида. Размер стержня мал по сравнению с диаметром обмотки соленоида. Найти магнитный поток, пронизывающий соленоид. *Указание:* воспользоваться теоремой взаимности.

## 10. Магнитное поле в веществе. Энергия магнитного поля

### 0

**10.1.** (6.1) Какой ток  $J$  нужно пустить по длинному и тонкому соленоиду с плотностью намотки  $n$  витков/см, чтобы индукция  $B$  была равна индукции постоянного магнита тех же размеров с намагниченностью  $M$ .

**10.2.** Длинный соленоид заполнен диамагнитным веществом с магнитной восприимчивостью  $\chi$  ( $\chi < 0$ ). Плотность намотки витков соленоида  $n$  см<sup>-1</sup>, ток  $J$ . Найти поверхностную плотность токов намагниченности вещества  $i_m$  и величину создаваемого ими поля  $B_m$ .

**10.3.** (7.58) С какой силой втягивается в соленоид с полем  $B$  длинный цилиндрический стержень с магнитной проницаемостью  $\mu$  и площадью поперечного сечения  $S$ ? Стержень расположен на оси соленоида так, что один конец находится глубоко внутри, а другой — вне соленоида, на значительном расстоянии от его торца.

## I

**10.4.** Постоянный магнит длиной  $L$  с однородной намагниченностью  $M$  согнут в кольцо так, что между полюсами остался маленький зазор  $\ell \ll L$ . Определите магнитную индукцию в зазоре.

**10.5.** Стержень из магнитного материала ( $\mu \gg 1$ ), имеющий форму цилиндра радиусом  $r$ , помещён во внешнее однородное магнитное поле  $B_0$ , направленное вдоль его оси. Оценить, на сколько индукция  $B$  в центре стержня длиной  $\ell$  ( $\ell \gg r$ ) отличается от индукции в бесконечно длинном стержне.

**10.6.** (6.26) Найти магнитную проницаемость идеального газа, состоящего из сверхпроводящих шариков радиусом  $r$ . Концентрация шариков равна  $n$  (при чем  $nr^3 \ll 1$ ).

**10.7.** (7.64) Электромагнит из железного бруса квадратного сечения в форме подковы имеет размеры в сантиметрах, указанные на рис. 16. Число витков  $N = 200$ , сила тока  $J = 2$  А, магнитная проницаемость  $\mu = 200$ . Найти подъёмную силу электромагнита.

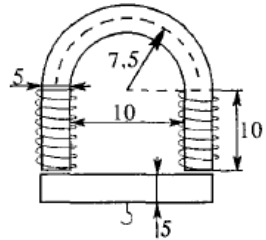


Рис. 16

## II

**10.8.** Цилиндрический постоянный магнит высотой  $h$  и радиусом  $r$  имеет постоянную намагниченность  $\vec{M}$ . В двух предельных случаях  $h \gg r$  и  $h \ll r$  найти индукцию  $\vec{B}$  в точках  $A_1$  и  $A_2$  на оси магнита и в точке  $C_1$  на его боковой поверхности (см. рис. 17), нарисовать качественную картину линий  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  в обоих случаях.

**10.9.** (6.13) Тороидальный сердечник составлен из двух половинок, сделанных из различных ферромагнитных материалов проницаемостями  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Общая длина сердечников равна  $L$ , ширина зазоров между ними —  $d$ . По обмотке сердечника, имеющей  $N$  витков течёт ток  $J$ . Определить величину поля в зазоре.

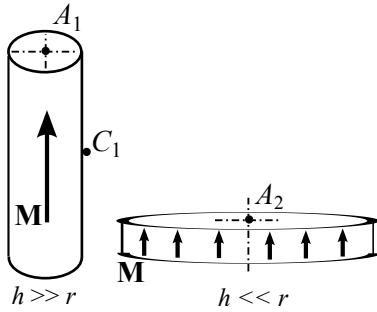


Рис. 17

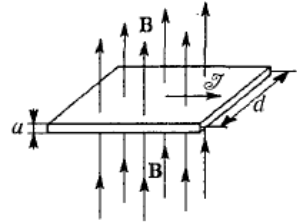


Рис. 18

**10.10.** (7.83) На какой высоте  $h$  постоянный магнетик с магнитным моментом  $\mu$  и массой  $m$  будет парить в горизонтальном положении над плоской горизонтальной сверхпроводящей поверхностью. Магнетик считать точечным диполем. (Указание: построить «изображение» точечного диполя и воспользоваться формулой потенциальной энергии взаимодействия точечных диполей).

### III

**10.11.** (7.20) Сверхпроводящий шарик летит по направлению к соленоиду вдоль его оси. Индукция поля в центре соленоида  $B = 1000$  Гс. Какова должна быть начальная скорость  $v$  шарика, чтобы он смог пролететь через соленоид насквозь? Диаметр соленоида много больше диаметра шарика. Плотность материала шарика  $\rho = 8$  г/см<sup>3</sup>.

**10.12.** (8.64) В однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  помещена тонкая металлическая лента шириной  $d$  (см. рис. 18) и толщиной  $a$  так, что плоскость ленты перпендикулярна к вектору индукции  $\vec{B}$ . По ленте пропускают ток силой  $I$ . Найдите разность потенциалов  $V$ , возникающую между краями ленты (т.е. на расстоянии  $d$ ), если концентрация свободных электронов в металле ленты  $n$  (частный случай эффекта Холла).

## 11. Электромагнитная индукция. Электрические цепи

### 0

**11.1.** Плоский проволочный виток, имеющий площадь  $S$  и сопротивление  $R$ , находится в однородном поле с индукцией  $B$ . Направление вектора магнитной индукции перпендикулярно плоскости витка. Магнит-

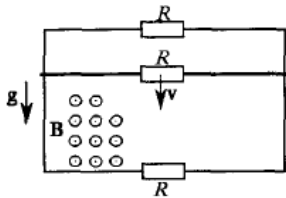


Рис. 19

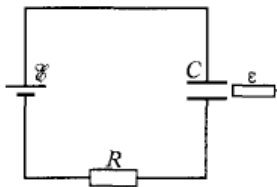


Рис. 20

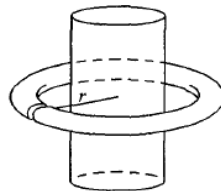


Рис. 21

ное поле исчезает с постоянной скоростью за время  $\tau$ . Какое количество теплоты выделится в витке?

**11.2.** (7.9) По двум вертикальным рейкам, соединенным сверху и внизу сопротивлениями  $R = 0,01$  Ом, может скользить без трения проводник, длина которого  $l = 100$  см, масса  $m = 100$  г, сопротивление  $R = 0,01$  Ом (см. рис. 19). Система находится в однородном горизонтальном магнитном поле, индукция которого  $B = 1000$  Гс перпендикулярна плоскости рисунка. Найти максимальную скорость проводника в поле силы тяжести. Сопротивлением реек пренебречь.

**11.3.** (9.4) Из конденсатора быстро извлекают пластину с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  так, что ёмкость скачкообразно изменяется до значения  $C$  (см. рис. 20). Найти зависимость тока в цепи от времени. Диэлектрическая пластина заполняет весь объем конденсатора. Параметры схемы указаны на рисунке.

## I

**11.4.** (7.6) На железный цилиндрический сердечник, через который проходит магнитный поток  $\Phi = \Phi_0 \cos(\omega t)$ , надет на тор из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  (см. рис. 21). В торе имеется бесконечно узкий воздушный зазор, образованный двумя бесконечно близкими разрезами вдоль меридиональных плоскостей. Найдите напряженность электрического поля  $E$  в зазоре в зависимости от расстояния  $r$  от оси цилиндра.

**11.5.** (7.13) Магнитный диполь с моментом  $\vec{\mu}$  вращается с угловой частотой  $\omega$  вокруг оси, проходящей через его центр и перпендикулярной магнитному моменту (см. рис. 22). Найти ток  $I$  в плоской круглой неподвижной рамке радиусом  $a$  с сопротивлением  $R$ , находящейся на расстоянии  $\ell \gg a$  от диполя. Нормаль  $\vec{n}$  к плоскости рамки перпендикулярна оси вращения диполя. Самоиндукцией рамки пренебречь.

**11.6.** (9.27) В схеме, изображенной на рис. 23, в некоторый момент времени замыкают ключ  $K$ , и конденсатор  $C$ , имеющий первоначальный заряд  $q_0$ , начинает разряжаться через индуктивность  $L$ . Когда ток





Рис. 22

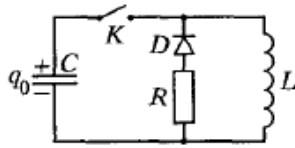


Рис. 23

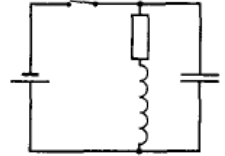


Рис. 24

разряда достигает максимального значения, ключ  $K$  вновь размыкают. Какой заряд протечет через сопротивление  $R$ ? Сопротивление диода  $D$  в схеме в прямом направлении много меньше  $R$ , в обратном — бесконечно велико.

**11.7.** (9.30) После размыкания ключа в контуре (см. рис. 24) возникают медленно затухающие колебания, амплитуда напряжения которых в  $n = 100$  раз превосходит напряжение батареи. Найти собственную частоту контура  $\omega_0$ , если уменьшение амплитуды колебаний в  $e$  раз происходит за время  $\tau = 0,1$  с.

## II

**11.8.** На гладкой горизонтальной поверхности расположено тонкое непроводящее кольцо массой  $m$ , по которому равномерно распределен заряд  $Q$ . Кольцо находится во внешнем однородном магнитном поле с индукцией  $B_0$ , ориентированном вертикально. Какую угловую скорость вращения приобретет кольцо после выключения магнитного поля?

**11.9.** (9.45) Конденсатор емкостью  $C$  присоединен к верхним концам двух параллельных медных шин, расположенных вертикально на расстоянии  $\ell$  друг от друга. Однородное магнитное поле  $B$  горизонтально и перпендикулярно к плоскости шин. Вдоль шин в магнитном поле падает без начальной скорости медный проводник массой  $m$  так, что всегда имеется контакт между проводником и шинами. Сопротивлением и индуктивностью проводников, а также трением проводника о шины пренебречь. Найти: 1) ускорение проводника; 2) силу тока, заряжающего конденсатор.

**11.10.** Параллельно соединенные катушка индуктивности  $L$  и резистор сопротивлением  $R$  подключены через ключ к источнику питания с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ . В начальный момент ключ разомкнут, и тока в цепи нет. Какой заряд протечет через резистор после замыкания ключа? Сопротивлением катушки индуктивности пренебречь.

### III

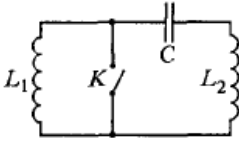


Рис. 25

**11.11.** (9.32) В начальный момент времени ( $t = 0$ ), когда через индуктивность  $L_1$  и замкнутый ключ  $K$  протекал ток  $I_0$ , а напряжение на конденсаторе равнялось нулю (см. рис. 25), размыкают ключ. Найти напряжение на конденсаторе и ток через него как функции времени. Активным сопротивлением всех элементов пренебречь.

## 12. Уравнения Максвелла. Энергия электромагнитного поля

### 0

**12.1.** Найдите модуль и направление вектора плотности потока электромагнитной энергии (вектора Пойнтинга) на поверхности длинного однородного провода радиуса  $r$ , по которому течёт ток  $I$ . Исходя из этого, найдите полную мощность, выделяющуюся в виде тепла, в расчёте на единицу длины провода. Удельное сопротивление проводника равно  $\rho$ .

**12.2.** Интенсивность излучения лазерной указки составляет  $I = 0,3$  мВт/мм<sup>2</sup>. Считая излучение лазера плоской линейно поляризованной волной, найдите плотность энергии излучения лазера  $w$  и амплитуду электрического  $E_0$  и магнитного поля  $B_0$ .

**12.3.** (12.4) Заряженный и отключенный от источника электричества плоский конденсатор медленно разряжается объёмными токами проводимости, возникающими в диэлектрике между обкладками из-за наличия слабой проводимости. Пренебрегая краевыми эффектами, вычислить напряжённость магнитного поля внутри конденсатора.

### I

**12.4.** Плоский воздушный конденсатор, обкладками которого являются два одинаковых диска, заряжен до высокой разности потенциалов и затем отключен от источника. В центре конденсатора происходит пробой (проскакивает искра), в результате чего конденсатор разряжается. Считая разряд квазистационарным и пренебрегая неоднородностью поля на краях конденсатора, определить а) магнитное поле  $B$  внутри конденсатора, если сила тока в искре в рассматриваемый момент равна  $J$ , б) полный поток электромагнитной энергии, вытекающий из пространства между обкладками.

**12.5.** (12.3) Пространство внутри длинного соленоида, состоящего из  $N$  витков проволоки, заполнено однородным веществом с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ . Длина соленоида равна  $\ell$ , радиус  $R$ . По обмотке соленоида течёт переменный ток  $I = I_0 \cos \omega t$ . Пренебрегая краевыми эффектами, вычислить магнитную и электрическую энергии, локализованные внутри соленоида, и найти отношение максимальных значений этих энергий.

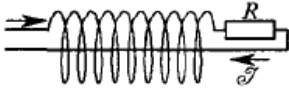


Рис. 26

**12.6.** (12.27) Постоянный ток  $I$  течёт по цепи, состоящей из резистора с сопротивлением  $R$  и длинной катушки радиусом  $r_2$  и плотностью намотки витков  $n$  [см $^{-1}$ ] и соосного с катушкой прямого провода радиусом  $r_1$  (см. рис. 26). Пренебрегая сопротивлением катушки и провода, найти аксиальную  $S_z$  и азимутальную  $S_\varphi$  компоненты вектора Пойнтинга внутри катушки вдали от её торцов. Вычислить поток энергии  $W$  через сечение катушки.

**12.7.** Исходя непосредственно из граничных условий для электрического и магнитного полей на границе вакуума и диэлектрика, найти коэффициент отражения  $\rho$  света при нормальном падении на границу раздела, если показатель преломления диэлектрика равен  $n$ . Найти значение  $\rho$  для отражения света от поверхности воды  $n = 1,33$ .

## II

**12.8.** Пространство между обкладками конденсатора заполнено однородным диэлектриком с диэлектрической и магнитной проницаемостями  $\varepsilon$  и  $\mu$ . Обкладки плоского конденсатора имеют форму дисков радиусом  $R$ . Конденсатор включён в цепь переменного тока  $I = I_0 \cos \omega t$ . Пренебрегая краевыми эффектами, вычислить электрическую и магнитную энергии, локализованные в конденсаторе. Найти отношение максимальной магнитной к максимальной электрической энергии. Расстояние между обкладками конденсатора  $d$ . Провести числовой расчёт для  $R = 10$  см, частоты  $\nu = 50$  Гц и  $\varepsilon = \mu = 1$ .

**12.9.** (12.10) Найти плотность тока смещения  $j_{\text{см}}$  в плоском конденсаторе, пластины которого раздвигаются со скоростью  $u$ , оставаясь параллельными друг другу, если 1) заряды на пластинах конденсатора остаются постоянными; 2) разность потенциалов между пластинами остается постоянной. Расстояние  $d$  между пластинами всё время мало по сравнению с их линейными размерами.

**12.10.** (12.28) Длинный соленоид (длина  $\ell$ , радиус  $r$ , число витков  $N$ ) подключается к источнику постоянной ЭДС  $\mathcal{E}$  через сопротивление  $R$  (сопротивление соленоида пренебрежимо мало). Найти электромаг-

нитную энергию, вытекающую в соленоид за время установления тока, и сравнить её с магнитной энергией соленоида  $LJ^2/2$ .

### III

**12.11.** (12.9) Плоскому конденсатору ёмкостью  $C$ , обкладками которого являются два одинаковых диска, сообщен заряд  $Q$ . Затем конденсатор отключают от источника электричества. После этого пластины соединяют длинным цилиндрическим проводом, проходящим вне конденсатора, и конденсатор разряжается. Пренебрегая неоднородностью поля на краях конденсатора, показать непосредственным расчётом, что полный поток электромагнитной энергии, вытекающей из конденсатора, равен полному потоку, вытекающему внутрь провода.

## ОТВЕТЫ

▷ **1.1.**  $\mu = (\alpha_1/\mu_1 + \alpha_2/\mu_2 + \alpha_3/\mu_3)^{-1} = 29,0 \text{ г/моль}$ . **1.2.** 2,65. **1.3.**  $\sim 800 \text{ м}$ .  
**1.4.**  $\Delta P = \lambda P_0 \Delta T = \alpha K \Delta T = 460 \text{ атм}$ . **1.5.**  $j = \frac{1}{4} n v$ , где  $n$  — концентрация.  
 $\langle \varepsilon \rangle = 2k_B T$ . **1.6.**  $T = 2(\varepsilon_0/k_B) \ln(N_A + \Delta N)/(N_A - \Delta N)$ . **1.7.**  $\langle \varepsilon_{\text{пот}} \rangle = k_B T$ ,  
 $C = 7RT/2$ . **1.8.**  $\langle v_x^2 \rangle = RT/\mu$ ,  $\varepsilon_x = \frac{1}{2} k_B T$ . **1.9.**  $\langle \varepsilon_{\text{вп}} \rangle = \frac{1}{2} k_B T$ ,  $U_{\text{вп}} = PV =$   
 $= 100 \text{ Дж}$ . **1.10.** 0,37%. **1.11.**  $N_A = RT \ln \alpha / [(4/3)\pi r^3(\rho - \rho_0)g\ell] \approx$   
 $\approx 6,5 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

▷ **2.1.** 1)  $T \sim V^{1/2}$ ; 2)  $C = C_P + R$ . **2.2.** 0,61 м/(с·К). **2.3.** 25 Дж.  
**2.4.** а)  $R/2$ , б)  $R$ , в)  $R$ . **2.5.**  $TV^{n-1} = \text{const}$ ;  $PV^n = \text{const}$ , где  $n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$ .

**2.6.**  $T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/4} \approx 400 \text{ К}$ ;  $v = \sqrt{\frac{8RT_1}{\mu} \left[1 - (P_2/P_1)^{1/4}\right]} \approx 860 \text{ м/с}$ .

**2.7.**  $\gamma = 4/3$ . **2.8.**  $\Delta T = -A/R = -5 \text{ К}$ . **2.9.**  $C = C_v + R/2$ . **2.10.**  $P_1/P_2 =$   
 $= (T_1/T_2)^{\gamma/(\gamma-1)} \geq 2,05$ . **2.11.**  $M_0/M = e^{v/v_0} \approx 22$ ,  $v = \sqrt{2C_p T/\mu} \approx 2,58 \text{ км/с}$ .

▷ **3.1.**  $\eta = (T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$ ;  $\eta = (T_1 - T_2)/2T_1$ . **3.2.** а) 4,93 Дж/К;  
 б) 6,9 Дж/К. **3.3.** 28,8 Дж/К. **3.4.**  $\Delta N = N_0 \Delta T/T_x = 1,8 \text{ Вт}$ . **3.5.** 1)

разные газы:  $\Delta S = C_p \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{T_1 T_2} - 2C_v \ln 2 = C_p \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2} + 2R \ln 2$ ; 2)

одинаковые газы:  $\Delta S = C_p \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2}$ . **3.6.**  $\Delta S = 3,2 \text{ кал/К}$ . **3.7.**  $A =$

$= \nu \left[ C_B T_c \ln \frac{T_c}{T_0} + \left(\frac{q}{T_0} - C_B\right) (T_c - T_0) \right]$ . **3.8.**  $\Delta S = N k_B \ln \frac{V_2}{V_1} = N k_B \ln 2$ .

**3.9.**  $\Delta S = R \ln(n+1)^2/4n$ . **3.10.**  $A_1/A_2 = 1,78$ . **3.11.**  $T_x = 299 \text{ К} = 26^\circ \text{С}$ .

**3.12.**  $p/p_0 = e^{\Delta S/k_B} \approx \exp\left(-\frac{C \Delta T^2}{2k_B T_0^2}\right)$ ,  $\sqrt{\Delta T^2} \approx T_0 \sqrt{\frac{k_B}{C}} \approx 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ К}$ , где  
 $C = 4,2 \text{ Дж/К}$  — теплоёмкость кубика воды.

▷ **4.1.** 185,6 Дж/г. **4.2.** 0,189 г/см<sup>3</sup>. **4.3.**  $T < 2050 \text{ К}$ . **4.4.**  $\eta = 1 -$   
 $-\frac{RT_1}{C_V(T_2 - T_1)} \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b}$  **4.5.** 1)  $\Delta T \approx \frac{bRT_0}{C_V + R} \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V}\right) > 0$ ; 2)  $\Delta T =$

$= -\frac{a}{C_V + R} \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V}\right) < 0$  **4.6.** 45 кДж. **4.7.**  $\frac{\Delta m}{m} \approx \frac{c \Delta T}{\lambda} \approx \frac{c T_0}{\lambda} \times$

$\times \left(\mu \lambda / (RT_0 \ln \frac{P}{P_0}) - 1\right)^{-1} \approx 15\%$ , где  $c$  — удельная теплоемкость воды.

**4.8.**  $A = 2,1 \text{ кДж}$ ;  $\Delta U = 0,36 \text{ кДж}$ ;  $Q = 2,46 \text{ кДж}$ . **4.9.**  $109^\circ \text{С}$ .

**4.10.**  $t_k = T_{k0} \left(1 + \frac{\mu_{\text{возд}} g H T_{k0}}{\mu_{\text{пар}} \lambda T_0}\right)^{-1} \approx 76^\circ \text{С}$ , где  $T_{k0} = 373 \text{ К}$  — темпера-

тура кипения у поверхности Земли. **4.11.**  $\frac{\Delta m}{m} = \left(\frac{C_p T}{\lambda} - 1\right) \frac{\Delta T}{T} \approx 0,17\%$

▷ **5.1.**  $P = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ атм} = 0,01 \text{ мм рт. ст.}$  **5.2.** 4,65 кВт. **5.3.**  $8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ .

**5.4.**  $\approx 3,5 \text{ см}$ . **5.5.**  $P = 7P_0/3$ . **5.6.** 385 К. **5.7.** а) 5,7 с; б) 89 с.

**5.8.**  $\tau \approx 15$  с. **5.9.** 1)  $\langle v \rangle = 3,8 \cdot 10^4$  см/с, 2)  $\lambda = 0,9 \cdot 10^{-5}$  см, 3)  $\nu = 5,6 \cdot 10^{28}$  с $^{-1}$ см $^{-3}$ , 4)  $\sigma = 0,3 \cdot 10^{-14}$  см $^2$ , 5)  $r = 3 \cdot 10^{-8}$  см. **5.10.** 1) Газ будет перетекать в сосуд с более высокой температурой; 2)  $m = 2M/15$ . **5.11.**  $t = 9RT\rho\ell^2/(4\lambda\langle v\rangle P\mu) \approx 220$  дней, где  $\mu$  и  $\rho$  — молярная масса и плотность воды,  $\langle v \rangle$  — средняя скорость молекул воды.

▷ **6.1.**  $\vec{E}_1 = \frac{2\vec{p}}{r^3}$ ;  $\vec{E}_2 = -\frac{\vec{p}}{r^3}$ . **6.2.**  $\varphi_{\text{шара}} = \varphi(\vec{r}_0)$ , где  $\vec{r}_0$  — радиус-вектор центра шара. **6.3.**  $r_{\text{min}} = \frac{158e^2}{W} = 4,5 \cdot 10^{-12}$  см. **6.4.**  $Q = \frac{SE_0}{4\pi} = 3,4$  (ед. СГСЭ). **6.5.** а)  $F = 3qp/R^3$ , б)  $F = 3p_1p_2/R^4$ . **6.6.**  $\varphi = 2\pi\sigma[(z^2+R^2)^{1/2}-z] \rightarrow \pi\sigma R^2/z$ ;  $E = 2\pi\sigma[1-z/(z^2+R^2)^{1/2}] \rightarrow \pi\sigma R^2/z^2$ . **6.8.**  $F = \frac{q^2}{4h^2}$ ;  $\sigma(r) = \frac{qh}{2\pi(h^2+r^2)^{3/2}}$ , где  $r$  — расстояние от перпендикуляра, опущенного из заряда на плоскость. **6.9.**  $\rho(r) = \frac{3e}{4\pi R^3}$ ;  $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2}{mR^3}} = 2,5 \cdot 10^{15}$  Гц. **6.10.**  $\varphi = (\varphi_0/d + 2\pi\rho d)x - 2\pi\rho x^2$ . **6.11.**  $F = 3p^2/4L_0^4 \approx 0,54 \cdot 10^{-5}$  Н,  $A = \frac{p^2}{4L_0^3} \left(1 - \frac{L_0^3}{L^3}\right) \approx 0,16$  эрг. **6.12.**  $F \sim \frac{2q^2R^3}{d^5}$ .

▷ **7.2.**  $\frac{q}{4\pi R^2} (1/\varepsilon_2 - 1/\varepsilon_1)$  **7.3.**  $\sigma_{\text{пол}} = P_n = P \cos \alpha$ . **7.4.** при  $R_0 \leq r < R$   $E = q/(\varepsilon r^2)$ ,  $D = q/r^2$ ; при  $r \geq R$   $E = D = q/r^2$ ;  $\varphi_{\text{ш}} = \frac{q}{R(1 + (R/R_0 - 1)/\varepsilon)}$ ;  $\sigma_{\text{пол}} = q(\varepsilon - 1)/(4\pi\varepsilon R^2)$  **7.5.**  $4\pi r^3 n$  **7.6.** в пластине  $E_1 = 4\pi P_0(x^2/d^2 - 1)$ , вне пластины  $E_2 = 0$ ,  $V = 16\pi P_0 d/3$  **7.7.**  $S_2 = \frac{\varepsilon - n}{\varepsilon - 1} \frac{S_1}{n} = 200$  см $^2$ . **7.8.**  $C = \frac{S(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{4\pi d \ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2)}$ . **7.9.**  $E_1 = D_1 = 4\pi P \frac{h}{d}$  — в зазоре;  $E_2 = -4\pi P \left(1 - \frac{h}{d}\right)$ ,  $D_2 = D_1$  — в пластине. **7.10.**  $\rho_{\text{пол}}(x) = \frac{3E_0 x^2}{4\pi d^3}$ ,  $P = \frac{E_0 x^3}{4\pi d^3}$ ,  $\vec{E}(x) = \vec{E}_0(x/d)^3$  внутри,  $D = 0$  внутри и вне пластинки. **7.11.**  $\vec{E} = \frac{4h}{R} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{R}{l}\right) \vec{P}$

▷ **8.1.**  $A = q/2a$ . **8.2.** 1)  $w_s = \frac{2\pi\sigma^2}{\varepsilon}$ , 2)  $f = \frac{2\pi\sigma^2}{\varepsilon}$ . **8.3.** 1)  $V = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{r_1 + r_2 + r_3} - \varepsilon_1$ ; 2)  $V = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{r_1 + r_2 + r_3} - \varepsilon_1$ . **8.4.**  $F = \frac{\varepsilon - 1}{(\varepsilon + 1)^2} \frac{V^2 \sqrt{S}}{2\pi d}$ . **8.6.**  $R = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1 \lambda_1} + \frac{1}{r_2 \lambda_2}\right)$ . **8.7.**  $\lambda(r) \propto r^{-4}$ . **8.8.** 1)  $R = \frac{3}{5} \frac{e^2}{mc^2} \approx 1,7 \cdot 10^{-13}$  см; 2)  $R = \frac{1}{2} \frac{e^2}{mc^2} \approx 1,4 \cdot 10^{-13}$  см. **8.9.**  $R = \frac{1}{4\pi \lambda C} = 4 \cdot 10^3$  Ом. **8.10.**  $D = 3,3$  см. **8.11.**  $M = \frac{(\varepsilon - 1)R^2 V^2}{16\pi d}$ , вытягивается внутрь.

▷ **9.1.**  $\alpha = \arctg(IB\ell/mg)$ . **9.2.**  $B = (I/cR)(\pi/2 + 2)$ ,  $c$  — скорость света в вакууме. **9.3.**  $M \approx 0,6$  Гн. **9.4.**  $\alpha = 2\pi NI(\cos \beta - \cos \alpha)/\ell$ .

**9.5.**  $B = \frac{2\pi R^2}{c(R^2 + r^2)^{3/2}} I$ ,  $\mu = \frac{\pi R^2 I}{c}$ ,  $|A_{\text{внеш}}| = 2\mu B_0$ . **9.6.**  $B = 3140$  Гс.

**9.7.**  $L = \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{R}{r}$  (СГСЭ). **9.8.**  $B = \frac{4Ir}{ca^2} \left(1 - \frac{r^2}{2a^2}\right)$ , при  $r \leq a$ ;  $B = \frac{2I}{cr}$ ,

при  $r \geq a$ . **9.9.**  $B = \frac{2\pi i}{c} \left(\frac{r}{R}\right)^2$ . **9.10.**  $B \leq \frac{c\Delta m}{\delta} \sqrt{\frac{2W}{em_0}} \approx 4000$  Гс,

$t = \frac{Me}{IAM_0} \approx 2,5$  года,  $\Delta m$  — разность масс атомов  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ ,  $A = 238$  —

атомная масса урана  $^{238}\text{U}$ . **9.11.**  $T = \frac{2\pi mc}{eB}$ ,  $l = \frac{2\pi Emc^2}{eB^2}$ . **9.12.**  $\Phi = 4\pi n\mu$ .

▷ **10.1.**  $J = cM/n$ . **10.2.**  $i_m = 4\pi\chi Jn$ ,  $B_m = (1 + 4\pi\chi)4\pi Jn/c$ . **10.3.**  $F =$   
 $= \frac{\mu - 1}{8\pi} B^2 S$ . **10.4.**  $B = 4\pi M \frac{L}{L + \ell} \approx 4\pi M$ . **10.5.**  $\Delta B \approx -\frac{\mu - 1}{1 + \ell^2/(2\mu r^2)} B_0$ .

**10.6.**  $\mu = 1 - 2\pi r^3 n$ . **10.7.**  $F \approx 49,8$  Н. **10.8.**  $B_{A_1} \approx 2\pi M$ ,  $B_{C_1} \approx 2\pi M \frac{r^2}{h^2}$ ;

$B_{A_2} \approx 2\pi M \frac{h}{r}$ . **10.9.**  $B = \frac{4\pi JN/c}{2d + (\frac{L}{2} - d) \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}\right)}$ . **10.10.**  $h = \frac{1}{2} \left(\frac{3\mu^2}{mg}\right)^{1/4} \approx$

$\approx 2,1$  см. **10.11.**  $v \geq B \sqrt{\frac{3}{8\pi\rho}} \approx 120$  см/с. **10.12.**  $V = IB/(can)$ .

▷ **11.1.**  $Q = B^2 S^2 / (R\tau)$ . **11.2.**  $v = 3mgRc^2 / (2B^2 l^2) \approx 1,5$  см/с. **11.3.**

$I(t) = (\varepsilon - 1) \frac{\mathcal{E}}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$ . **11.4.**  $E = \frac{\varepsilon\omega}{2\pi cr} \Phi_0 \sin(\omega t)$ . **11.5.**  $I(t) =$

$= \frac{2\mu\pi a^2 \omega}{cR\ell^3} \sin(\omega t)$ . **11.6.**  $q = \frac{q_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ . **11.7.**  $\omega_0 = 2n/\tau \approx 2 \cdot 10^3$  рад/с.

**11.8.**  $\omega = \frac{QB_0}{2mc}$ . **11.9.** 1)  $a = \frac{g}{1 + CB^2 \ell^2/m}$ ; 2)  $I = \frac{gBlC}{1 + CB^2 \ell^2/m}$ . **11.10.**  $q =$

$= L\mathcal{E}/Rr$ . **11.11.**  $I(t) = \frac{L_1}{L_1 + L_2} I_0 \cos \omega t$ ,  $V(t) = I_0 L_1 \omega \sin \omega t$ , где  $\omega =$   
 $= 1/\sqrt{(L_1 + L_2)C}$ .

▷ **12.1.**  $S = \frac{I^2 \rho}{2\pi r^3}$ ,  $\dot{Q} = \frac{I^2 \rho}{\pi r^2} = \frac{I^2 R}{L}$ , где  $R = \rho \frac{L}{\pi r^2}$  — сопротивление про-

водника длиной  $L$ . **12.2.**  $w = 10^{-5}$  эрг/см<sup>3</sup>,  $E_0 = 0,016$  ед. СГСЭ = 480 В/м,  
 $B_0 = 0,016$  Гс. **12.3.**  $H = 0$ . **12.4.**  $B = \frac{2I}{cr} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$ , поток энергии

равен нулю. **12.5.**  $W_M = \frac{2\pi^2 \mu R^2 N^2}{c^2 \ell} I_0^2 \cos^2 \omega t$ ,  $W_\Phi = \frac{\varepsilon \mu^2 \pi^2 \omega^2 R^4 N^2}{4c^4 \ell} I_0^2 \sin^2 \omega t$ ,

$\frac{W_M^{max}}{W_\Phi^{max}} = \frac{\varepsilon \mu}{2} \left(\frac{\omega R}{2c}\right)^2 \approx 1,3 \cdot 10^{-15}$ . **12.6.**  $S_z = \frac{I^2 R}{2\pi r^2 \ln(r_2/r_1)}$ ,  $S_\varphi = \frac{I^2 R n}{r \ln(r_2/r_1)}$ ;

$W = J^2 R$ , направлен в сторону резистора. **12.7.**  $\rho = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$ ,  $\rho_{\text{воды}} = 2\%$ .

**12.8.**  $W_{\text{э}} = \frac{2dI_0^2 \sin^2 \omega t}{\varepsilon \omega^2 R^2}$ ,  $W_{\text{м}} = \frac{\mu dI_0^2 \cos^2 \omega t}{4c^2}$ ,  $\frac{W_{\text{м}}^{\text{max}}}{W_{\text{э}}^{\text{max}}} = \frac{\varepsilon \mu}{2} \left( \frac{\omega R}{2c} \right)^2 \approx 1,3 \cdot 10^{-15}$ .

**12.9.** 1)  $j_{\text{см}} = 0$ ; 2)  $j_{\text{см}} = -\frac{Vu}{4\pi d^2}$ . **12.10.**  $W = \frac{\mu_0 N^2 \mathcal{E}^2 \pi r^2}{2\ell R^2} = \frac{LJ^2}{2}$  (СИ).



Учебное издание

**ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ:  
ТЕРМОДИНАМИКА, ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

Учебно-методическое пособие  
по курсу *Общая физика*

Редактор *И. А. Волкова*. Корректор *О. П. Котова*

Подписано в печать 06.07.2012. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ .  
Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 100 экз. Заказ № .

федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»  
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
rio@mail.mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»  
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9