

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике Центрального оргкомитета Всероссийских олимпиад школьников Министерства образования и науки Российской Федерации  
Телефоны: (095) 408-80-77, 408-86-95.  
E-mail: fizolimp@mail.ru (с припиской antispaM к теме письма)

Авторский коллектив — Александров Д., Иоголевич И., Кармазин С., Козел С., Слободянин В., Шведов О.

Общая редакция — Козел С., Слободянин В.

Техническая редакция, оформление и верстка — Чудновский А., Самокотин А.

При подготовке оригинал-макета использовалась издательская система L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>.  
© Авторский коллектив  
Подписано в печать 11 апреля 2005 г. в 15:59.

141700, Московская область, г. Долгопрудный  
Московский физико-технический институт

### Задача 1. Три резиновых шнура

Три резиновых шнура связывают вместе и медленно растягивают в разные стороны (рис. 1). В некоторый момент длины всех трех шнуров оказываются равны  $L_1 = 20$  см. Затем шнуры растягивают под другими углами (рис. 2). В этом случае равенство длин шнуров наступает при длине  $L_2 = 30$  см каждого из них. Известна начальная длина самого длинного шнура в недеформированном состоянии:  $l = 15$  см. Найдите длины двух других шнуров и отношение жесткостей шнуров. Считайте, что резиновые шнуры подчиняются закону Гука.

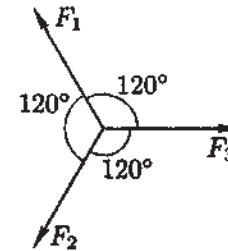


Рис. 1

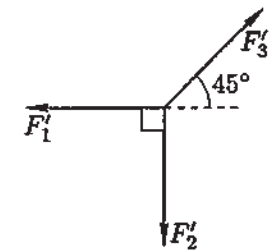


Рис. 2

### Задача 2. Средняя скорость поезда

Поезд метро проходит расстояние  $S$  между станциями, разгоняясь с ускорением  $a$  до середины перегона и тормозя с таким же по модулю ускорением на второй половине пути. В какой момент времени  $\tau$  от начала движения средняя скорость  $\bar{v}$  поезда на пройденном участке пути максимальна? Найдите это максимальное значение  $\bar{v}_{\max}$  и расстояние  $l$  от начала пути, на котором оно достигается.

### Задача 3. «Черный ящик»

В коробке («черном ящике») с четырьмя выводами находятся четыре одинаковых резистора. С помощью омметра измеряется сопротивление между выводами 1 и 2 (рис. 3). При этих измерениях поочередно соединялись накоротко выводы 1-3, 2-3 и 2-4. Результаты измерений следующие:  $R_{13} = 3$  Ом,  $R_{23} = 3$  Ом,  $R_{24} = 4$  Ом,  $R_{00} = 4$  Ом. Индексы указывают, какие выводы «черного ящика» были закорочены при данном измерении. Индекс «00» означает, что никакие два вывода не соединялись накоротко.



Рис. 3

Расшифруйте по этим данным схему «черного ящика» и определите сопротивление  $R$  резисторов, а также  $R_{14}$  и  $R_{34}$ .

## Задача 4. Удельная теплоемкость свинца

На олимпиаде по физике участникам было предложено выполнить следующий эксперимент. Пенопластовый стакан емкостью  $V_0$ , закрытый сверху пенопластовой крышкой, в которую вставлен термометр, заполнялся горячей водой, и, по мере остывания воды, снималась зависимость ее температуры  $T$  от времени  $t$ . Затем в стакан помещался кусок свинца плотностью  $\rho = 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и объемом  $V = V_0/2$ , стакан доверху заполнялся горячей водой, и вновь снималась зависимость  $T(t)$ . Аккуратный ученик изобразил оба графика на одном листе миллиметровой бумаги (кривые I и II на рис. 4). Принимая удельную теплоемкость воды равной  $c_0 = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ , определите по этим экспериментальным кривым удельную теплоемкость  $s$  свинца. Плотность воды  $\rho_0 = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Теплоемкостью стенок стакана и крышки можно пренебречь. Температуру в комнате, где проводился эксперимент, считайте постоянной.

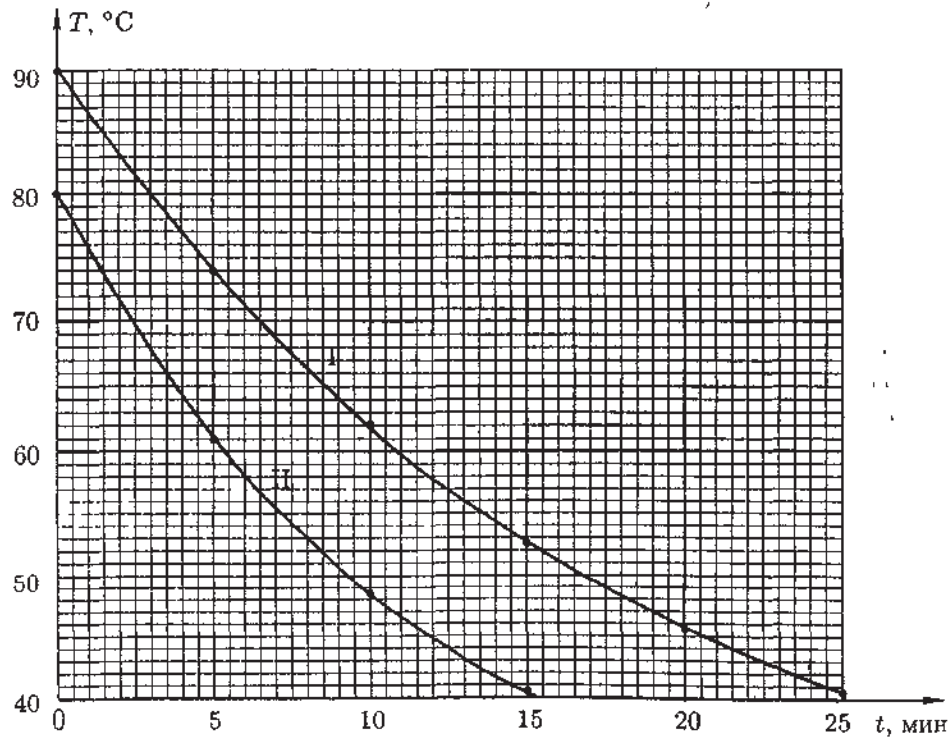


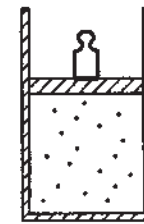
Рис. 4

Необходимые построения можно выполнять на графике в условии. Условие необходимо сдать вместе с решением.

## Задача 1. Двойная звезда

«Двойная звезда» состоит из двух звезд, находящихся на постоянном расстоянии друг от друга. Космонавт Глюк решил вывести космический корабль на орбиту таким образом, чтобы он находился все время на отрезке, соединяющем звезды, на постоянном расстоянии от каждой из звезд и расходовал при этом минимальное количество топлива. Проведя все расчеты, Глюк нашел, что корабль должен находиться на расстоянии  $l_1$  от первой звезды и  $l_2$  от второй, и успешно вывел корабль на орбиту. Чему равно отношение  $M_1/M_2$  масс звезд?

## Задача 2. Неквазистатические процессы



В цилиндре с теплонепроницаемыми стенками под массивным теплонепроницаемым поршнем находится идеальный одноатомный газ. На поршень поставили гирию, масса которой равна массе поршня (рис. 5). После того как система пришла в новое состояние термодинамического равновесия, гирию быстро сняли и вновь дождались наступления равновесного состояния. Определите, какая температура  $T$  газа установится в цилиндре после четырех таких циклов, если первоначальная температура равнялась  $T_0 = 300 \text{ К}$ . Считайте, что трение между поршнем и стенками цилиндра пренебрежимо мало. Внешним давлением можно пренебречь.

Рис. 5

## Задача 3. Теплоемкость системы

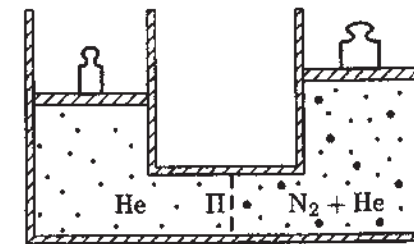


Рис. 6

В сосуде находятся гелий  $\text{He}$  и азот  $\text{N}_2$  в количестве  $\nu_1$  и  $\nu_2$  соответственно. Сосуд разделен на две части пористой перегородкой  $\text{П}$  (рис. 6), которая свободно пропускает гелий и не пропускает азот, причем изначально азот был только в правой части. Пренебрегая теплоемкостью стенок сосуда и поршней, найдите теплоемкость системы при нагревании в следующих условиях:

1. при закрепленных поршнях;
2. при свободных поршнях, создающих постоянные давления;
3. при свободном левом поршне, создающем постоянное давление, и закрепленном правом поршне.

Универсальная газовая постоянная  $R$  известна.

**Задача 4. Периодическая подзарядка конденсатора**

В цепи (рис. 7) состояние ключа  $K$  периодически изменяют: замыкают на время  $\tau$ , затем размыкают на время  $2\tau$ , снова замыкают на время  $\tau$  и размыкают на время  $2\tau$  и так далее. Время  $\tau$  достаточно мало, так что напряжение на конденсаторе большой емкости  $C$  не успевает за это время заметно измениться. После большого количества переключений напряжение на конденсаторе становится практически постоянным, совершая лишь небольшие колебания около своего среднего значения. ЭДС источника  $\mathcal{E}$  и сопротивление  $R$  каждого из резисторов известны. Найдите в установившемся режиме:

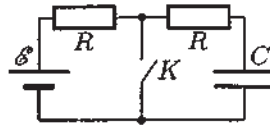


Рис. 7

1. среднее значение напряжения  $U$  на конденсаторе;
2. среднюю силу тока  $I$ , текущего через ключ;
3. отношение средних тепловых мощностей, выделяющихся на резисторах.

**Задача 5. Сверхпроводящий соленоид и конденсатор**

В некоторый момент сверхпроводящий соленоид объемом  $V = 40 \text{ см}^3$  подключают к высоковольтному конденсатору емкостью  $C = 100 \text{ мкФ}$ , заряженному до напряжения  $U = 1 \text{ кВ}$ . Известно, что при индукции магнитного поля в соленоиде  $B_0 = 1,6 \text{ Тл}$  разрушается состояние сверхпроводимости материала, из которого выполнена обмотка соленоида. Определите, произойдет ли разрушение сверхпроводимости в описанном эксперименте. Магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  единиц СИ.

**Задача 1. Из области фантастики**

Предположим, что в результате какой-то космической катастрофы Луна остановилась в своем орбитальном движении вокруг Земли. Определите, сколько времени  $\tau$  Луна будет падать на Землю и с какой относительной скоростью  $v$  планеты столкнутся. Расстояние от Земли до Луны  $L = 3,84 \cdot 10^5 \text{ км}$ , радиус Земли  $R = 6370 \text{ км}$ . Массу и размер Луны можно считать малыми по сравнению с массой и размером Земли.

**Задача 2. Неквазистатические циклические процессы**

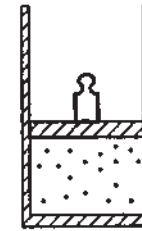


Рис. 8

В состоянии равновесия идеальный двухатомный газ занимает ровно половину объема теплоизолированного сосуда с массивным теплоизолированным поршнем. На поршень поставили гирию (рис. 8). Когда система пришла в новое состояние термодинамического равновесия, оказалось, что давление газа возросло на 25%. Затем гирию быстро сняли и вновь дождались наступления равновесного состояния. Сколько таких циклов  $n$  установки и снятия гири можно совершить, пока поршень не вылетит из цилиндра при очередном удалении гири? Считайте, что трение между поршнем и стенками цилиндра пренебрежимо мало. Внешним давлением можно пренебречь.

**Задача 3. Газ Клаузиуса**

Разрабатывая кинетическую теорию газов, Клаузиус ввел в уравнение состояния идеального газа (в расчете на 1 моль) поправку  $b$ , которая имеет смысл собственного объема молекул газа:

$$p(V - b) = RT.$$

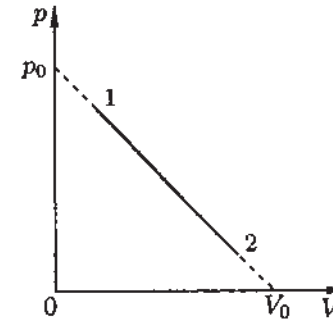


Рис. 9

Процесс 1-2 (рис. 9) производится сначала с одним молем идеального газа, а затем с одним молем газа Клаузиуса. Найдите разность  $\Delta T$  максимальных температур газов в этих опытах, а также укажите, какая из них больше.

Известно, что  $p_0 = 1,51 \text{ МПа}$ ,  $b = 44 \text{ см}^3/\text{моль} \ll V_0$ ,  $R = 8,310 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

**Задача 4. Сверхпроводящий соленоид и источник**

Сверхпроводящий соленоид длиной  $l = 10$  см и площадью поперечного сечения  $S = 1,6$  см<sup>2</sup> имеет  $N = 1000$  витков. В некоторый момент соленоид подключают к источнику с ЭДС  $\mathcal{E} = 24$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,2$  Ом. Известно, что при индукции магнитного поля  $B_0 = 1,26$  Тл состояние сверхпроводимости обмотки соленоида разрушается. Определите, перейдет ли в этом эксперименте обмотка соленоида из сверхпроводящего в нормальное состояние и, если да, то через какое время  $t_0$  после подключения, а если нет, то при какой ЭДС  $\mathcal{E}$  источника переход бы произошел. Магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  единиц СИ.

**Задача 5. Фотоэффект**

Цинковый шарик радиусом  $R = 1$  см расположен в вакууме вдали от других тел и заряжен до потенциала  $\varphi_0 = -0,5$  В (полагая на бесконечности  $\varphi = 0$ ). Шарик осветили монохроматическим ультрафиолетовым светом с длиной волны  $\lambda = 290$  нм.

1. С какой максимальной скоростью  $v_1$  вылетают фотоэлектроны из шарика?
2. Какую максимальную скорость  $v_2$  будут иметь на большом расстоянии от шарика фотоэлектроны, вылетевшие из него в начале опыта?
3. Найдите потенциал  $\varphi_1$  шарика после продолжительного облучения.
4. Какое число  $N$  фотоэлектронов покинет шарик при продолжительном облучении ультрафиолетом?

Красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_0 = 332$  нм. Скорость света  $c = 3,0 \cdot 10^8$  м/с. Постоянная Планка  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж/с. Электрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Заряд электрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Масса электрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

**Возможные решения**

9 класс

**Задача 1. Три резиновых шнура**

На узелок, связывающий концы шнуров, действуют три силы натяжения шнуров, причем в обоих случаях их сумма равна нулю, следовательно:

$$F_1 = F_2 = F_3, \quad F'_1 = F'_2 = \frac{F'_3}{\sqrt{2}}.$$

Самый длинный шнур (в недеформированном состоянии) — третий, так как при равном увеличении деформации его сила натяжения возрастает быстрее, следовательно, именно его длина в недеформированном состоянии равна  $l$ . Пусть  $l_1, l_2, l_3$  — начальные длины шнуров,  $k_1, k_2, k_3$  — их жесткости, тогда для первого и второго способа растяжения шнуров запишем соответственно:

$$\begin{cases} k_1(L_1 - l_1) = F_1 = F_2 = k_2(L_1 - l_2), \\ k_1(L_2 - l_1) = F'_1 = F'_2 = k_2(L_2 - l_2). \end{cases}$$

Поскольку  $L_1 \neq L_2$ , то

$$l_1 = l_2, \quad k_1 = k_2$$

Шнуры 1 и 3 получили одинаковое дополнительное растяжение во втором опыте, поэтому:

$$\frac{k_3}{k_1} = \frac{F'_3 - F_3}{F'_1 - F_1} = \frac{F'_3 - F_3}{\frac{1}{\sqrt{2}}F'_3 - F_3} = \frac{L_2 - L_1}{\frac{1}{\sqrt{2}}(L_2 - l) - (L_1 - l)} \approx 1,78.$$

Из условия

$$k_1(L_1 - l_1) = F_1 = F_3 = k_3(L_1 - l)$$

найдем

$$l_1 = L_1 - \frac{k_3}{k_1}(L_1 - l) \approx 11,1 \text{ см.}$$



**Задача 2. Средняя скорость поезда**

График зависимости координаты  $x$  поезда от времени  $t$  представлен на рис. 10. Средняя скорость  $\bar{u}(t)$  на участке пути, пройденном к моменту времени  $t$ , равна угловому коэффициенту  $k(t) = x(t)/t$  прямой, проходящей через точку  $(t; x(t))$  и начало координат. Из графика видно, что  $\bar{u}_{\max}$  соответствует прямой, касающейся кривой  $x(t)$  в точке  $(\tau; l)$ .

Поезд проходит расстояние  $S/2$  от станции отправления за время  $t_0 = \sqrt{S/a}$ . Зависимость  $x(t)$  для  $t > t_0$  имеет вид:

$$x(t) = \frac{S}{2} + at_0(t - t_0) - \frac{a}{2}(t - t_0)^2. \quad (1)$$

С другой стороны,

$$x(\tau) = \bar{u}_{\max}\tau. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем

$$\frac{1}{2}a\tau^2 + (\bar{u}_{\max} - 2at_0)\tau + \frac{3}{2}at_0^2 - \frac{S}{2} = 0. \quad (3)$$

Поскольку при  $t = \tau$  прямая  $x = \bar{u}_{\max}t$  касается графика квадратичной функции  $x(t)$ , дискриминант (3) должен быть равен нулю:

$$(\bar{u}_{\max} - 2at_0)^2 - 3a^2t_0^2 + aS = 0, \quad \text{откуда} \quad \bar{u}_{\max} = \sqrt{aS}(2 \pm \sqrt{2}).$$

В последней формуле следует оставить только знак «+», поскольку  $\bar{u}_{\max}$  не может превышать максимальной за все время движения скорости поезда  $v_0 = at_0 = \sqrt{aS}$ . Подставив  $\bar{u}_{\max}$  в (3), найдем  $\tau = \sqrt{2S/a}$ . Искомое расстояние  $l = \bar{u}_{\max}\tau = 2S(\sqrt{2} - 1) \approx 0,83S$ .

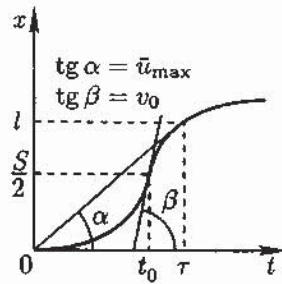


Рис. 10

**Задача 3. «Черный ящик»**

Заметим, что  $R_{24} = R_{00}$ . Это означает, что при замыкании накоротко выводов 2 и 4 шунтируется участок цепи, через который ток не течет. Следовательно, вывод 4 может быть соединен через резистор только с выводом 2. Остальные три резистора соединены с выводами 1, 2 и 3 по симметричной схеме. Возможны две схемы «черного ящика». Для первой из них (рис. 11):  $R = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_{14} = 2,4 \text{ Ом}$ ,  $R_{34} = 3,6 \text{ Ом}$ , а для второй (рис. 12):  $R = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_{14} = \frac{4}{3} \text{ Ом} \approx 1,3 \text{ Ом}$ ,  $R_{34} = \frac{10}{3} \text{ Ом} \approx 3,3 \text{ Ом}$ .

*Примечание.* За обоснованное указание одной из возможных схем ставится полный балл.

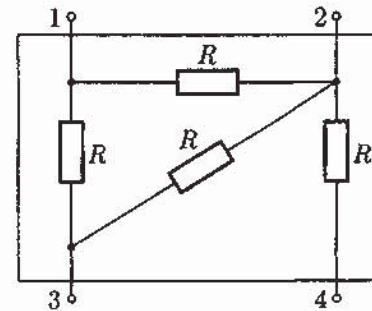


Рис. 11

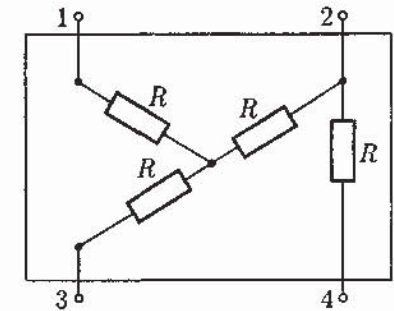


Рис. 12

**Задача 4. Удельная теплоемкость свинца**

Пусть  $C_1$  и  $C_2$  — теплоемкости содержимого стакана в первом и втором опытах соответственно. Тогда

$$C_1 = c_0\rho_0 V_0, \quad C_2 = c_0\rho_0 \frac{V_0}{2} + c\rho \frac{V_0}{2} = c_0\rho_0 V_0 \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{c\rho}{c_0\rho_0} \right),$$

откуда

$$c = \left( 2 \frac{C_2}{C_1} - 1 \right) \frac{\rho_0}{\rho} c_0.$$

Мощность теплопотерь в окружающую среду определяется только температурой  $T$  содержимого стакана, а наклон касательной к графику зависимости  $T(t)$  при некоторой фиксированной температуре  $T_0$  обратно пропорционален теплоемкости. Поэтому отношение  $C_2/C_1$  равно отношению наклонов касательных к кривым I и II, построенных в точках с одинаковой температурой  $T_0$ . Например, при  $T_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  из графиков найдем

$$C_2/C_1 = 0,67 \pm 0,02, \quad \text{откуда} \quad c = (0,13 \pm 0,01) \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг } ^\circ\text{C}}.$$

**Задача 1. Двойная звезда**

Двойная звезда совершает вращательное движение вокруг центра масс. При этом звезды движутся по окружностям радиусами

$$R_1 = \frac{M_2}{M_1 + M_2} l, \quad R_2 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} l,$$

где  $l = l_1 + l_2$  — расстояние между звездами. Из второго закона Ньютона для движения первой звезды

$$M_1 \omega^2 R_1 = \frac{GM_1 M_2}{l^2}$$

найдем угловую скорость вращения системы

$$\omega^2 = \frac{G(M_1 + M_2)}{l^3}.$$

Космический корабль массой  $m$  должен двигаться с той же угловой скоростью вокруг центра масс двойной звезды по окружности радиусом

$$r = |R_1 - l_1|. \quad (4)$$

Двигатель корабля может быть выключен, если движение корабля по окружности определяется только суммарной силой тяжести:

$$m\omega^2 r = -\frac{GM_1 m}{l_1^2} + \frac{GM_2 m}{l_2^2}. \quad (5)$$

При выборе знаков в правой части предполагалось, что корабль находится между центром масс системы и первой звездой, то есть  $l_1 < R_1$ , следовательно:

$$m\omega^2 \left( \frac{M_2 l}{M_1 + M_2} - l_1 \right) = -\frac{GM_1 m}{l_1^2} + \frac{GM_2 m}{l_2^2}. \quad (6)$$

Такое же уравнение получается в случае  $l_1 > R_1$ , так как изменения знаков правой части (5) и подмодульного выражения в (4) происходят одновременно. Решая (6), находим

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{(l_1 + l_2)^3 - l_2^3}{(l_1 + l_2)^3 - l_1^3} \cdot \frac{l_1^2}{l_2^2}.$$

*Примечание.* Можно показать, что рассмотренная орбита является неустойчивой, поэтому потребуется небольшой расход топлива на ее регулярную корректировку.

**Задача 2. Неквазистатические процессы**

Процессы, протекающие в цилиндре с газом не являются равновесными, поэтому использовать уравнение Пуассона для адиабаты нельзя. Применим закон сохранения энергии системы «газ-поршень-гири» к неквазистатическому процессу сжатия газа из состояния  $(T_1, V_1, p_1)$  в состояние  $(T_2, V_2, p_2)$  под действием установленной гири:

$$\Delta U_{12} = \nu C_V (T_2 - T_1) + 2mg(h_2 - h_1) = 0, \quad (7)$$

где  $\nu$  — количество газа,  $m$  — масса гири (равная массе поршня),  $h_1$  и  $h_2$  — начальная и конечная вертикальные координаты поршня. Пусть  $S$  — площадь сечения поршня, тогда

$$V_1 = Sh_1, \quad V_2 = Sh_2, \quad p_1 = \frac{mg}{S}, \quad p_2 = 2p_1 = \frac{2mg}{S}.$$

Используя уравнение Менделеева-Клапейрона

$$p_1 V_1 = \nu RT_1, \quad p_2 V_2 = \nu RT_2,$$

из (7) получим:

$$\Delta U_{12} = \nu C_V (T_2 - T_1) + \nu RT_2 - 2\nu RT_1 = 0,$$

откуда

$$T_2 = \frac{C_V + 2R}{C_V + R} T_1 = \frac{7}{5} T_1.$$

Аналогично, рассмотрим неквазистатический процесс расширения газа в состояние  $(T_3, V_3, p_3)$  после снятия гири:

$$\Delta U_{23} = \nu C_V (T_3 - T_2) + mg(h_3 - h_2) = 0.$$

Поскольку  $mg h_3 = (mg/S)Sh_3 = p_3 V_3 = \nu RT_3$ , то

$$\Delta U_{23} = \nu C_V (T_3 - T_2) + \nu RT_3 - \frac{1}{2} \nu RT_2 = 0,$$

откуда

$$T_3 = \frac{C_V + R/2}{C_V + R} T_1 = \frac{4}{5} T_2 = \frac{28}{25} T_1.$$

После 4 циклов сжатия и расширения установится температура

$$T = \left( \frac{28}{25} \right)^4 T_0 \approx 1,57 T_0 \approx 472 \text{ K}.$$



**Задача 3. Теплоемкость системы**

1. При закрепленных поршнях подводимое тепло идет только на изменение внутренней энергии гелия и азота:

$$\Delta U = \frac{3}{2}\nu_1 R\Delta T + \frac{5}{2}\nu_2 R\Delta T,$$

откуда находим теплоемкость

$$C_1 = \left(\frac{3}{2}\nu_1 + \frac{5}{2}\nu_2\right) R.$$

2. При подвижных поршнях подводимое тепло идет на изменение внутренней энергии и на совершение работы:

$$\Delta Q = \Delta U + A = \frac{3}{2}\nu_1 R\Delta T + \frac{5}{2}\nu_2 R\Delta T + p_1\Delta V_1 + p_2\Delta V_2,$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давления газа под левым и правым поршнями соответственно,  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  — изменения объемов левой и правой частей сосуда. Заметим, что  $p_1$  и  $(p_2 - p_1)$  — парциальные давления гелия и азота. Из уравнений состояния

$$p_1(V_1 + V_2) = \nu_1 RT_1, \quad (p_2 - p_1)V_2 = \nu_2 RT_2 \quad (8)$$

выразим работу газов

$$A = p_1\Delta V_1 + p_2\Delta V_2 = p_1\Delta(V_1 + V_2) + (p_2 - p_1)\Delta V_2 = \nu_1 R\Delta T + \nu_2 R\Delta T.$$

Следовательно, теплоемкость процесса

$$C_2 = \left(\frac{5}{2}\nu_1 + \frac{7}{2}\nu_2\right) R.$$

3. При закрепленном правом поршне подводимое тепло идет на изменение внутренней энергии и на работу по перемещению левого поршня:

$$\Delta Q = \Delta U + A' = \frac{3}{2}\nu_1 R\Delta T + \frac{5}{2}\nu_2 R\Delta T + p_1\Delta V_1.$$

Используя, что  $\Delta V_2 = 0$ , из тех же уравнений (8) выразим работу

$$A = p_1\Delta V_1 = p_1\Delta(V_1 + V_2) = \nu_1 R\Delta T.$$

Следовательно, теплоемкость процесса

$$C_3 = \left(\frac{5}{2}\nu_1 + \frac{5}{2}\nu_2\right) R.$$

**Задача 4. Периодическая подзарядка конденсатора**

1. При разомкнутом ключе конденсатор заряжается током

$$I_1 = \frac{\mathcal{E} - U}{2R},$$

а при замкнутом ключе — разряжается током

$$I_2 = \frac{U}{R}.$$

В стационарном состоянии количество приходящего заряда  $I_1 \cdot 2\tau$  должно равняться количеству уходящего заряда  $I_2 \cdot \tau$ :

$$\frac{\mathcal{E} - U}{2R} \cdot 2\tau = \frac{U}{R} \cdot \tau, \quad \text{откуда} \quad U = \frac{\mathcal{E}}{2}.$$

2. Пока ключ замкнут (в течение времени  $\tau$ ), через него течет ток силой

$$I_K = \frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U}{R} = \frac{3\mathcal{E}}{2R}.$$

Когда ключ разомкнут (в течение времени  $2\tau$ ), тока нет. Средний ток равен отношению заряда, протекшего за период, к длительности периода:

$$I = \frac{\frac{3\mathcal{E}}{2R} \cdot \tau + 0 \cdot 2\tau}{\tau + 2\tau} = \frac{\mathcal{E}}{2R}.$$

3. Сила тока через левый резистор (рис. 13) равна

$$I' = \frac{\mathcal{E}}{R},$$

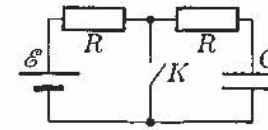


Рис. 13

пока ключ замкнут, и

$$I'' = \frac{\mathcal{E} - U}{2R} = \frac{\mathcal{E}}{4R},$$

когда ключ разомкнут. Средняя мощность равна отношению тепла, выделившегося за период, к длительности периода:

$$P_1 = \frac{\left(\frac{\mathcal{E}}{R}\right)^2 R \cdot \tau + \left(\frac{\mathcal{E}}{4R}\right)^2 R \cdot 2\tau}{\tau + 2\tau} = \frac{3\mathcal{E}^2}{8R}.$$

Аналогично, средняя мощность, выделяющаяся на правом резисторе, равна

$$P_2 = \frac{\left(\frac{\mathcal{E}}{2R}\right)^2 R \cdot \tau + \left(\frac{\mathcal{E}}{4R}\right)^2 R \cdot 2\tau}{\tau + 2\tau} = \frac{\mathcal{E}^2}{8R}.$$

Отношение мощностей равно трем.

**Задача 5. Сверхпроводящий соленоид и конденсатор**

Пусть  $N$  — число витков соленоида,  $l$  — длина,  $S$  — площадь поперечного сечения, тогда индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 \frac{S}{l} N^2.$$

Ток в соленоиде достигнет максимума, когда конденсатор разрядится:

$$\frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{CU^2}{2}, \quad \text{откуда} \quad I_{\max} = \frac{U}{N} \sqrt{\frac{Cl}{\mu_0 S}}.$$

Индукция магнитного поля в этот момент

$$B_{\max} = \mu_0 \frac{N}{l} I_{\max} = U \sqrt{\frac{\mu_0 C}{Sl}} = U \sqrt{\frac{\mu_0 C}{V}} \approx 1,77 \text{ Тл.}$$

Поскольку  $B_{\max} > B_0$ , то сверхпроводящее состояние разрушится.

**Задача 1. Из области фантастики**

Поскольку масса  $M$  Земли велика по сравнению с массой  $m$  Луны, то будем считать Землю покоящейся. Падение остановившейся Луны на Землю можно рассматривать как движение по вырожденному эллипсу с большой полуосью  $a = L/2$  и периодом обращения  $T = 2\tau$ . По третьему закону Кеплера

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = \text{const.} \quad (9)$$

Гравитационную постоянную  $G$  и массу Земли выразим через ускорение свободного падения на поверхности Земли:

$$g = \frac{GM}{R^2}, \quad \text{откуда} \quad GM = gR^2. \quad (10)$$

Из (9) и (10) находим

$$\tau = \frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{a^3}{gR^2}} = \frac{\pi L}{2R} \sqrt{\frac{L}{2g}} \approx 4,19 \cdot 10^5 \text{ с} \approx 4,85 \text{ сут.}$$

Из закона сохранения энергии

$$-\frac{GMm}{L} = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{R},$$

найдем относительную скорость столкновения планет

$$v = \sqrt{2gR \left(1 - \frac{R}{L}\right)} \approx \sqrt{2gR} \approx 11,2 \text{ км/с.}$$

*Примечание.* Константу в законе Кеплера (9) помнить не обязательно, так как ее легко вывести, рассмотрев частный случай — круговую орбиту.

**Задача 2. Неквазистатические циклические процессы**

Процессы, протекающие в цилиндре с газом не являются равновесными, поэтому использовать уравнение Пуассона для адиабаты нельзя. Применим закон сохранения энергии системы «газ-поршень-гири» к неквазистатическому процессу сжатия газа из состояния  $(p_1, V_1)$  в состояние  $(p_2, V_2)$  под действием установленной гири:

$$\Delta U_{12} = \frac{5}{2}(p_2 V_2 - p_1 V_1) + (4m + m)g(h_2 - h_1) = 0, \quad (11)$$



где  $4m$  — масса поршня,  $m$  — масса гири,  $h_1$  и  $h_2$  — начальная и конечная вертикальные координаты поршня. Пусть  $S$  — площадь сечения поршня, тогда

$$p_1 = \frac{4mg}{S}, \quad p_2 = 1,25p_1 = \frac{5mg}{S}, \quad V_1 = Sh_1, \quad V_2 = Sh_2. \quad (12)$$

Преобразовав (11) с использованием (12), получим

$$V_2 = \frac{6}{7}V_1.$$

Аналогично, рассмотрим неквазистатический процесс расширения газа в состоянии  $(p_3, V_3)$  после снятия гири:

$$\Delta U_{23} = \frac{5}{2}(p_3V_3 - p_2V_2) + 4mg(h_3 - h_2) = 0. \quad (13)$$

Поскольку  $4mgh_3 = (4mg/S)Sh_3 = p_3V_3$ , то из (13) получим

$$V_3 = \frac{33}{28}V_2 = \frac{99}{98}V_1.$$

Поскольку за каждый цикл объем будет увеличиваться в  $99/98$  раза, то всего циклов потребуется

$$n = \frac{\ln 2}{\ln(99/98)} \approx 68,3 \approx 68.$$

### Задача 3. Газ Клаузиуса

В рассматриваемом процессе

$$p = p_0 \left(1 - \frac{V}{V_0}\right).$$

Температура газа Клаузиуса

$$T = \frac{p(V-b)}{R} = -\frac{p_0}{RV_0} (V^2 - (V_0+b)V + V_0b).$$

Когда  $dT/dV = 0$ , то есть при  $V = (V_0 + b)/2$ , температура достигает своего максимального значения

$$T_K = \frac{p_0V_0}{4R} \left(1 - \frac{b}{V_0}\right)^2 \approx \frac{p_0V_0}{4R} \left(1 - \frac{2b}{V_0}\right).$$

Максимальную температуру в процессе с идеальным газом можно получить, выполнив предельный переход  $b \rightarrow 0$ :

$$T_i = \frac{p_0V_0}{4R}.$$

Таким образом, максимальная температура в процессе с идеальным газом на

$$\Delta T = T_i - T_K \approx \frac{p_0b}{2R} \approx 4,0 \text{ К}$$

больше, чем в процессе с газом Клаузиуса.

### Задача 4. Сверхпроводящий соленоид и источник

Найдем ток  $I_0$ , при котором индукция магнитного поля достигает критического значения:

$$B_0 = \mu_0 I_0 \frac{N}{l}, \quad \text{откуда} \quad I_0 = \frac{B_0 l}{\mu_0 N} \approx 100,3 \text{ А.}$$

Максимальный ток, который может обеспечить источник,

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r} = 120 \text{ А} > 100 \text{ А} \approx I_0,$$

значит, сверхпроводящее состояние разрушится. Из правила Кирхгофа

$$L \frac{dI}{dt} + rI = \mathcal{E}$$

найдем ток через соленоид в зависимости от времени:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} \left(1 - e^{-t/\tau}\right),$$

где постоянная времени  $\tau = L/r$ , индуктивность соленоида  $L = \mu_0 N^2 S/l$ . Критическое значение силы тока достигается в момент времени

$$t_0 = -\tau \ln \left(1 - \frac{I_0 r}{\mathcal{E}}\right) = -\frac{\mu_0 S N^2}{lr} \ln \left(1 - \frac{B_0 l r}{\mu_0 N \mathcal{E}}\right) \approx 18,15 \text{ мс} \approx 18 \text{ мс.}$$

## Задача 5. Фотоэффект

1. Энергия кванта падающего света частотой  $\nu$ :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Работа выхода определяется красной границей фотоэффекта:

$$A = \frac{hc}{\lambda_0}.$$

По формуле Эйнштейна найдем максимальную кинетическую энергию вылетевшего электрона:

$$K_{\max} = E - A = hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \approx 8,677 \cdot 10^{-20} \text{ Дж.}$$

Поскольку  $K_{\max} = mv_1^2/2$ , то

$$v_1 = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} \approx 4,37 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

2. Из закона сохранения энергии для первых электронов

$$K_{\max} + e\varphi_0 = \frac{mv_2^2}{2} \quad \text{находим} \quad v_2 = \sqrt{\frac{2(K_{\max} + e\varphi_0)}{m}} \approx 6,05 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

3. Потенциал шарика после продолжительного облучения найдем из того условия, что электроны больше не смогут улетать далеко от шарика:

$$K_{\max} + e\varphi_1 = 0, \quad \text{откуда} \quad \varphi_1 = -\frac{K_{\max}}{e} \approx +0,54 \text{ В.}$$

4. Потенциал шарика  $\varphi = q/(4\pi\epsilon_0 R)$  за время облучения изменился на  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$ , следовательно, его заряд изменился на

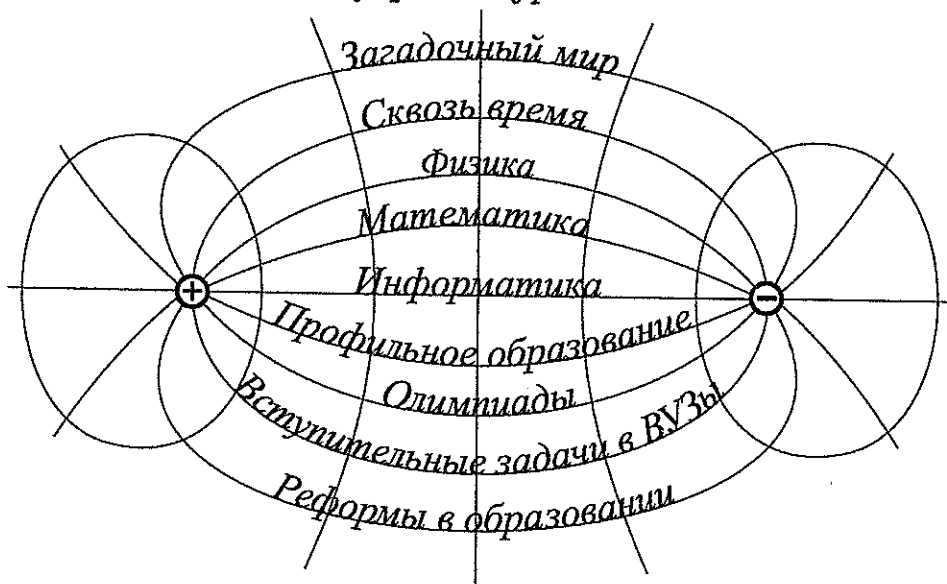
$$\Delta q = 4\pi\epsilon_0 R \Delta\varphi, \quad \text{откуда} \quad N = \frac{\Delta q}{-e} = \frac{4\pi\epsilon_0 R(\varphi_1 - \varphi_0)}{-e} \approx 7,2 \cdot 10^6.$$

# Потенциал

В апреле 2005 года выходит третий номер научно-популярного физико-математического журнала «Потенциал» для старшеклассников и учителей. Журнал ежемесячный.

Учредителями журнала являются заочная физико-техническая школа при МФТИ и издательство «Азбука».

Рубрики журнала:



Планируемый тираж — 10000 экземпляров. Объем — 80 страниц.  
Приглашаются все желающие принять участие в работе журнала.

Координаты для связи с редакцией

г. Москва, ул. Рабочая 84  
(095) 768 2548, 787 2494

fizteh@nm.ru  
www.fizteh.nm.ru

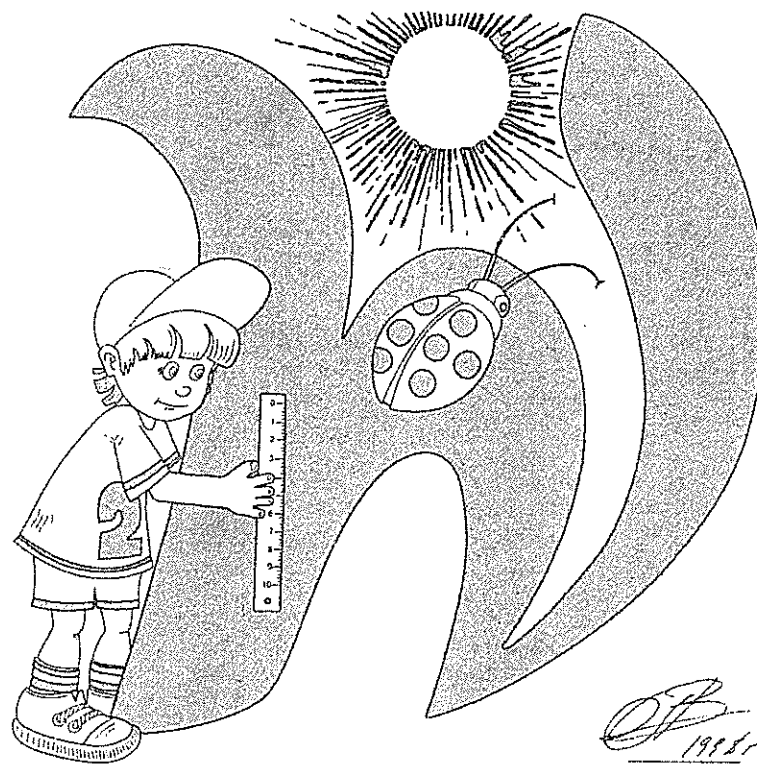
Федеральное агентство по образованию  
Центральный оргкомитет Всероссийских олимпиад

## XXXIX Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



*OP*  
1981

Саранск, 2005 г.



Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике  
Центрального оргкомитета Всероссийских олимпиад школьников  
Министерства образования и науки Российской Федерации  
Телефоны: (095) 408-80-77, 408-86-95.  
E-mail: fizolimp@mail.ru (с припиской *antispam* к теме письма)

Авторский коллектив — Андреев И., Варламов С., Козел С., Слободянин В.

Общая редакция — Козел С., Слободянин В.

Оформление и верстка — Чудновский А., Самокотин А.

При подготовке оригинал-макета  
использовалась издательская система  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ .  
© Авторский коллектив  
Подписано в печать 13 апреля 2005 г. в 15:02.

141700, Московская область, г. Долгопрудный  
Московский физико-технический институт

### Задача 1. Регулируемый «черный ящик»

В «черном ящике», имеющем 3 вывода, собрана электрическая цепь, состоящая из нескольких резисторов с постоянным сопротивлением и одного переменного резистора. Сопротивление переменного резистора можно изменять от нуля до некоторого максимального значения  $R_0$  с помощью регулировочной ручки, выведенной наружу.

С помощью омметра исследуйте схему «черного ящика» и, предполагая, что число находящихся в нем резисторов минимально,

1. изобразите схему электрической цепи, заключенной в «черном ящике»;
2. вычислите сопротивления постоянных резисторов и величину  $R_0$ ;
3. оцените точность вычисленных вами значений сопротивлений.

### Задача 2. Лед с водой

Определите массовую долю льда в смеси льда и воды на момент выдачи.

*Оборудование.* Смесь воды со льдом, термометр, часы.

*Примечание.* Удельная теплоемкость воды  $c = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ , удельная теплота плавления льда  $\lambda = 335 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

**Задача 1. Колебания физического маятника**

Стержень с двумя грузами  $A$  и  $B$  укреплен на горизонтальной оси и может совершать угловые колебания (рис. 1), то есть представляет собой физический маятник. Нижний груз  $A$  закреплен на стержне неподвижно, а верхний груз  $B$  может перемещаться и закрепляется на стержне с помощью винта.

1. Произведите измерения периода  $T$  малых колебаний такого маятника при различных положениях груза  $B$  (ниже и выше оси вращения), характеризующихся координатой  $x$  груза, отсчитываемой вниз от оси вращения.

2. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости  $T(x)$  с указанием погрешностей измерений.

3. Снимите со стержня груз  $B$  и измерьте с возможно большей точностью период  $T_0$  малых колебаний маятника без этого груза.

4. Отклоните маятник на угол  $\sim 30^\circ$  (на глаз) и вновь измерьте период колебаний  $T_{30}$ . Найдите отношение  $k = (T_{30} - T_0)/T_0$  в вашем эксперименте.

*Примечание.* Малыми колебаниями маятника называются колебания с угловой амплитудой, не превышающей  $(10 \div 15)^\circ$ .

*Оборудование.* Физический маятник с двумя грузами, секундомер, линейка, миллиметровая бумага.

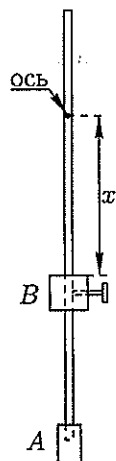


Рис. 1

**Задача 2. Бутылка с воздухом**

1. Предположим, что давление воздуха в бутылке превышает атмосферное. Придумайте и изобразите схему установки для измерения избыточного давления воздуха в бутылке.

2. Соберите установку по созданию и измерению избыточного давления в бутылке. Проверьте герметичность установки.

3. С помощью собранной установки измерьте объем части бутылки, заполненный воздухом.

*Оборудование.* Бутылка, частично заполненная водой, полиэтиленовая прозрачная трубочка с иглой, шприц с иглой, сосуд с водой, штатив, доска, лист миллиметровой бумаги, пластилин, ножницы, скотч.

**Задача 1. Трансформатор**

В коробке собрана цепь (рис. 2). В цепь последовательно с резистором  $R_0$  включена первичная обмотка малоомощного трансформатора. Определите:

1. сопротивление  $r$  первичной обмотки на постоянном токе;  
2. активное сопротивление  $R$  первичной обмотки на переменном токе частотой  $f = 50$  Гц.

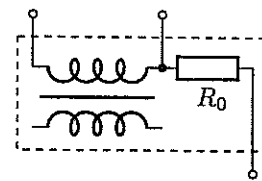


Рис. 2

3. индуктивность  $L$  первичной обмотки;

4. тепловую мощность  $P$ , выделяющуюся в железном сердечнике трансформатора в условиях эксперимента.

*Оборудование.* Электрическая цепь (рис. 2), низковольтный источник тока частотой  $f = 50$  Гц, резистор  $R_0$ , мультиметр, миллиметровая бумага.

**Задача 2. Дифракционная решетка**

Определите с наибольшей точностью период  $d$  дифракционной решетки.

*Оборудование.* Дифракционная решетка, лазер с неизвестной длиной волны (лазерная указка), компакт-диск с шириной дорожки  $d_0 = 1,6$  мкм, миллиметровая бумага, пластилин.

**ВНИМАНИЕ.** Во избежание повреждения сетчатки не направляйте свет лазера в глаза. Лазер следует включать только на время измерений.

Возможные решения

9 класс

**Задача 1. Регулируемый «черный ящик»**

1. Подключая омметр к каждой из трех пар выводов (1,2), (1,3), (2,3) и изменяя при этом сопротивление переменного резистора, убеждаемся, что все три сопротивления  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{23}$  соответствующих пар выводов «черного ящика» изменяются. Это возможно при числе резисторов не меньше трех, причем если их три, то соединение должно быть выполнено треугольником (рис. 3). Сопротивление  $R_{23}$  при некотором положении регулировочной ручки обращается в ноль, значит, переменный резистор подключен между выводами 2 и 3.

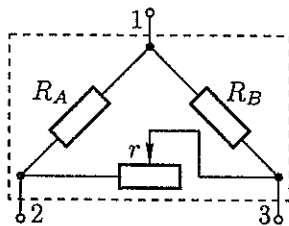


Рис. 3

2. Заметим, что сопротивления  $R_{12}$  и  $R_{13}$  при изменении сопротивления  $r$  переменного резистора изменяются, но остаются равными друг другу, следовательно, в силу симметрии схемы  $R_A = R_B = R$ . Если установить  $r = 0$ , то измерения сопротивлений между выводами дают  $R_{12} = R_{13} = 1$  кОм. При этом резисторы  $R_A$  и  $R_B$  оказываются соединенными параллельно, то есть

$$R_{12} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} = \frac{R}{2}, \quad \text{откуда} \quad R_A = R_B = R = 2R_{12} = 2 \text{ кОм.}$$

Теперь установим максимальное значение сопротивления переменного резистора ( $r = R_0$ ) и измерим  $R_{23} = 1$  кОм. Поскольку

$$R_{23} = \frac{2RR_0}{2R + R_0}, \quad \text{то} \quad R_0 = \frac{2RR_{23}}{2R - R_{23}} = 1,33 \text{ кОм.}$$

3. Омметр обеспечивает точность 1%, следовательно, погрешность  $R_A$  и  $R_B$  равна 1%, а погрешность  $R_0$  — порядка 3%, так как она складывается из погрешностей величин, использованных при вычислении  $R_0$ .

**Задача 2. Лед с водой**

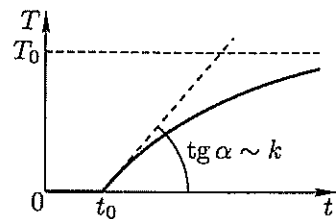


Рис. 4

Измерим зависимость температуры  $T$  смеси воды и льда от времени  $t$ . Смесь нужно постоянно помешивать, чтобы температура была одинакова на любой глубине. Температура начинает подниматься от  $0^\circ\text{C}$  не с начала эксперимента, а с момента времени  $t_0$ , когда весь лед растаял. Пока вода еще не сильно нагрелась, можно считать, что мощность  $P$  потока тепла из окружа-

ющей среды в сосуд осталась прежней, так как она пропорциональна разности температур среды  $T_0$  и смеси  $T$ . Построим график  $T(t)$  (рис. 4) и определим по нему угловой коэффициент  $k = \Delta T / \Delta t$  сразу после момента  $t_0$ . Пусть  $m$  — начальная масса льда,  $M$  — общая масса смеси, тогда уравнения теплового баланса для плавления льда и нагревания воды будут иметь соответственно вид:

$$\lambda m = Pt_0, \quad cM\Delta T = P\Delta t, \quad \text{откуда} \quad \frac{m}{M} = \frac{c}{\lambda} t_0 k.$$



## Задача 1. Колебания физического маятника

Период малых колебаний необходимо измерять с погрешностью порядка сотых долей секунды. Чтобы достичь такой точности, следует измерять длительность не менее 20 колебаний, а также выполнять повторные измерения. Построив график зависимости  $T(x)$ , обнаруживаем плавное «провисание» кривой (рис. 5). Минимальный период  $T_{\min} = (1,06 \pm 0,01)$  с наблюдается при  $x \approx 15$  см. Эти значения могут несколько различаться для разных экспериментальных установок.

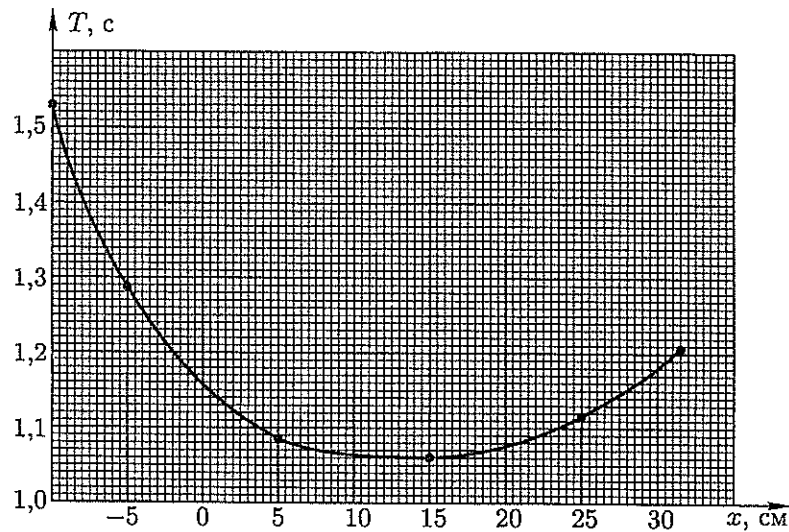


Рис. 5

При измерении периода малых колебаний маятника без груза  $B$  получается значение  $T_0 = (1,18 \pm 0,01)$  с. Период колебаний маятника с угловой амплитудой около  $30^\circ$  оказался равным  $T_{30} = (1,20 \div 1,21)$  с. Это значение является приблизительным, так как оно зависит от устанавливаемого «на глаз» начального отклонения маятника. Во всех опытах было отмечено, что  $T_{30} > T_0$ . По приведенным экспериментальным данным можно найти

$$k = \frac{T_{30} - T_0}{T_0} = 0,017 \div 0,025.$$

## Задача 2. Бутылка с воздухом

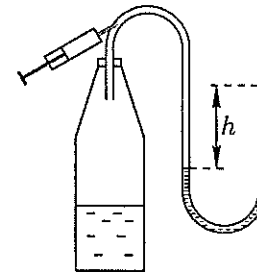


Рис. 6

С помощью штатива устанавливаем доску вертикально и закрепляем на ней лист миллиметровой бумаги. Делаем из трубочки водяной манометр и соединяем его с бутылкой (рис. 6). Присоединяем к системе шприц. Все соединения герметизируем пластилином. После этого проводим проверку на герметичность: нагреваем бутылку рукой и наблюдаем повышение давления в ней по манометру. После этого вдвигаем шприцем в бутылку объем  $\Delta V$  воздуха (перед этим давление в бутылке равно атмосферному). Пусть  $V$  — объем воздуха в бутылке,  $p_0$  — атмосферное давление,  $\Delta p$  — изменение давления воздуха в бутылке. По закону Бойля-Мариотта

$$p_0(V + \Delta V) = (p_0 + \Delta p)V, \quad \text{откуда} \quad V = \frac{p_0}{\Delta p} \Delta V = \frac{p_0 \Delta V}{\rho g h},$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды,  $h$  — разность уровней воды в коленях манометра (измеряется по миллиметровке). Поскольку процесс не является строго изотермическим, то в течение  $\sim 30$  с после вдвигания воздуха происходит выравнивание температур и давление падает. Измерять нужно именно это установившееся значение давления.

## Задача 1. Трансформатор

1. Сопротивление первичной обмотки на постоянном токе измеряется мультиметром, включенным в качестве омметра к выходам обмотки:

$$r = 120 \text{ Ом.}$$

2,3. Электрическая схема обмотки трансформатора может быть представлена в виде последовательно соединенных идеальной катушки индуктивностью  $L$  и резистора сопротивлением  $R$  (рис. 7). Заметим, что  $R > r$ . Это связано с дополнительными тепловыми потерями энергии на периодическое перемагничивание железного сердечника.

Вследствие нелинейных свойств железного сердечника параметры  $L$  и  $R$  зависят от протекающего по виткам обмотки тока, а, следовательно, и от приложенного напряжения. Результаты измерений ( $U_{\text{тр}} = 1,3 \text{ В}$ ,  $U_{R_0} = 3,9 \text{ В}$ ) получены с использованием источника переменного напряжения с действующим значением  $U_0 = 5,0 \text{ В}$ .

Заметим, что  $U_{R_0} + U_{\text{тр}} > U_0$ . Это объясняется наличием фазовых сдвигов между напряжениями на различных участках. Изобразим диаграмму напряжений (рис. 8). С помощью теоремы косинусов находим

$$\cos \varphi = \frac{U_0^2 - U_{R_0}^2 - U_{\text{тр}}^2}{2U_{R_0}U_{\text{тр}}} \approx 0,80, \quad \text{откуда} \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 0,60.$$

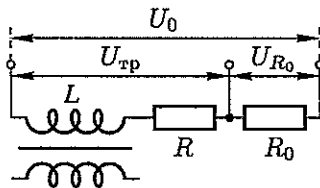


Рис. 7

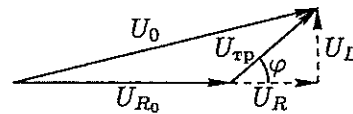


Рис. 8

Активная и реактивная составляющие напряжения на трансформаторе

$$U_R = U_{\text{тр}} \cos \varphi \approx 1,04 \text{ В}, \quad U_L = U_{\text{тр}} \sin \varphi \approx 0,78 \text{ В}.$$

С помощью мультиметра в качестве омметра измеряем  $R_0 = 5 \text{ кОм}$ , откуда находим то в цепи  $I = U_{R_0}/R_0 = 0,78 \text{ мА}$ . Таким образом,

$$R = \frac{U_R}{I} \approx 1,3 \text{ кОм}, \quad L = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_L}{I} \approx 3,2 \text{ Гн}.$$

4. Тепловая мощность, выделяющаяся в железном сердечнике,

$$P = I^2(R - r) \approx 0,7 \text{ мВт}.$$

## Задача 2. Дифракционная решетка

Для выполнения данного задания необходимо провести два эксперимента с дифракционными решетками.

1. Измерение длины волны лазера. В этом эксперименте компакт-диск с известной шириной дорожки  $d_0$  используется в качестве отражательной дифракционной решетки. Длина волны  $\lambda$  определяется по формуле

$$\lambda = \frac{d_0 \sin \varphi_m}{m},$$

где  $m$  — порядок дифракционного максимума, а  $\varphi_m$  — соответствующий угол отклонения. Поскольку компакт-диск представляет собой решетку с достаточно малым периодом, то при определении  $\lambda$  нельзя пользоваться приближением малых углов. Для расчета  $\lambda$  следует использовать максимумы 1 и 2 порядков. Проведенные измерения дали:  $\varphi_1 = 24,2^\circ$ ,  $\varphi_2 = 54,0^\circ$ , откуда  $\lambda \approx 650 \text{ нм}$ .

2. Измерение периода  $d$  решетки. В этом эксперименте используется длина волны  $\lambda$  лазера, определенная в предыдущем опыте. Предложенная дифракционная решетка работает «на просвет». Она является достаточно грубой, поэтому при вычислениях можно пользоваться приближением малых углов:

$$d \approx \lambda \frac{m}{\varphi'_m}.$$

Для расчета лучше использовать максимумы высоких порядков, так как это уменьшает относительную погрешность. Из измерения  $\varphi'_6 = 0,132$  находим  $d \approx 30 \text{ мкм}$ . Относительная погрешность измерений не превосходит 5%.