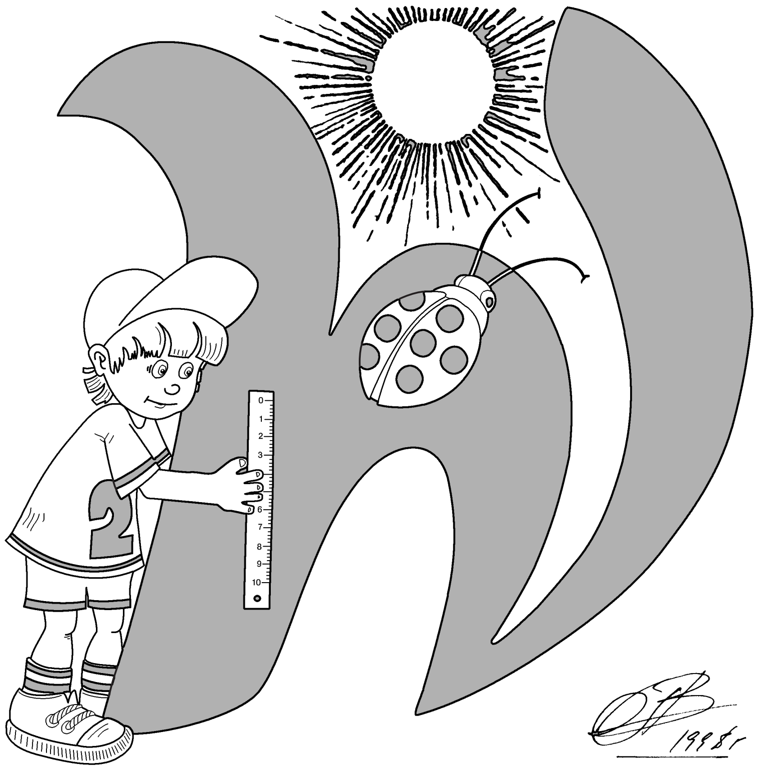
**Методическая комиссия по физике
при центральном оргкомитете
Всероссийских олимпиад школьников**

XLVI Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Теоретический тур

Методическое пособие



Саранск, 2012 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике
при центральном оргкомитете Всероссийских олимпиад школьников
Телефоны: (495) 408-80-77, 408-86-95.
E-mail: **physolymp@gmail.com**

Авторы задач

9 класс	**10 класс**	**11 класс**
1. Замятнин М.	1. Аполонский А.	1. Атауллин В.
2. Кармазин С.	2. Воробьёв И.	2. Аполонский А.
3. Кобякин А.	3. Кармазин С.	3. Проскурин М.
4. Слободянин В.	4. Воробьёв И.	4. Слободянин В.
5. Слободянин В.	5. Аполонский А.	5. Ерофеев И., Осин М.

Общая редакция — Ко́зел С., Слободянин В.

Оформление и вёрстка — Паринов Д., Цыбров Ф.

При подготовке оригинал-макета
использовалась издательская система $\LaTeX\,2_\varepsilon$.

Подписано в печать 17 апреля 2012 г. в 10:46.

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

9 класс

Задача 1. Поплавок в ракете

В ракете, готовой к старту, находится большой аквариум, частично заполненный водой плотностью ρ_0. Внутрь аквариума помещен тонкий цилиндрический поплавок плотностью ρ с поперечным сечением S, прикреплённый ко дну лёгкой пружиной жесткостью k. Перед стартом ракеты пружина растянута на x_0, а поплавок частично выступает из воды.

1. Определите, увеличится или уменьшится высота выступающей части поплавка, если система придёт в движение с постоянным ускорением, направленным вверх. Ответ обоснуйте.

2. При достижении ракетой ускорения a высота выступающей над водой части поплавка изменилась на x. Найдите аналитическую зависимость x от a.

3. Рассчитайте численное значение x для следующих параметров задачи: $k = 10$ Н/м, $x_0 = 1$ см, $\rho_0 = 1000$ кг/м^3, $S = 10^{-4}$ м^2, $g = 10$ м/с^2, $a = 3g$.

Задача 2. Пружина и шарик

На горизонтальном столе вертикально закреплена длинная гладкая труба, внутри которой установлена лёгкая пружина. Внутри трубы с высоты $H = 2$ м над столом без начальной скорости начинает падать шарик. Коснувшись верхнего витка пружины, шарик прилипает к нему. На рис. 1 приведён график зависимости кинетической энергии E_k падающего шарика от его высоты h над поверхностью стола. Определите длину L_0 недеформированной пружины, коэффициент жёсткости пружины k и массу шарика m. Считайте, что потери механической энергии в момент касания шариком верхнего витка пружины не происходит, и что закон Гука справедлив при любых деформациях пружины. Примите $g = 10$ м/с^2.

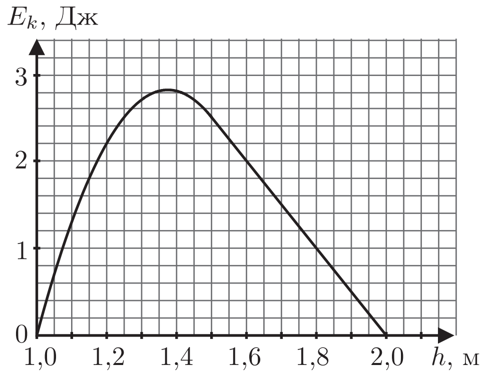


Рис. 1

Примечание. Для расчётов используйте выданный Вам отдельно увеличенный рисунок 1.

Задача 3. Предварительный подогрев

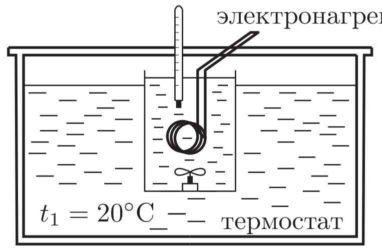


Рис. 2

В лаборатории у экспериментатора Глюка были электронагреватель с мешалкой, термостат и два тонкостенных химических стакана, линейные размеры которых отличались в 2 раза (толщина стенок стаканов одинакова). В термостате поддерживалась постоянная температура $t_1 = 20°$C (рис. 2). Глюк решил исследовать, как зависит температура жидкости в стакане от времени (мешалка нужна для быстрого выравнивания температуры по всему объёму стакана).

Сначала он использовал стакан меньшего размера, который заполнил исследуемой жидкостью при температуре $t_1 = 20°$C и поместил в термостат. Включив электронагреватель, Глюк обнаружил, что за первые $\tau_1 = 10$ с система нагрелась на $\Delta t_1 = 1°$C. Спустя продолжительное время температура жидкости установилась на отметке $t_2 = 40°$C.

Во втором эксперименте он взял больший стакан, заполнил его той же жидкостью, нагретой до температуры $t_3 = 35°$C, и включил тот же нагреватель в сеть. Через некоторое время τ_2 он с удивлением обнаружил, что температура содержимого в стакане понизилась на $\Delta t_2 = 0{,}5°$C.

Считайте, что теплоёмкость стаканов мала по сравнению с теплоёмкостью содержащейся в них жидкости.

1. Найдите температуру t_4, которая установится в стакане спустя продолжительное время?

2. Вычислите время τ_2.

Примечание. Известно, что поток энергии проходящий через слой вещества (стенки стакана) в единицу времени, прямо пропорционален разнице температур на границах слоя и площади поверхности слоя.

Задача 4. Диод

Полупроводниковый диод – это устройство, которое пропускает электрический ток только в одном направлении (рис. 3). Если диод включить в обратном направлении (рис. 4), ток через него течь не будет. Вольт-амперная характеристика (зависимость силы тока через диод от напряжения на диоде), идеализированного диода приведена на графике (рис. 5).

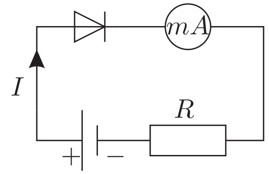


Рис. 3

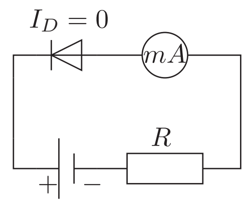


Рис. 4

1. На рисунке 6 изображен фрагмент разветвленной электрической цепи. Сопротивления резисторов равны: $R_1 = 6$ кОм, $R_2 = 5$ кОм. Определите падение напряжения на диоде и силу тока, протекающего через миллиамперметр.

2. Диод включили в цепь другой полярностью (рис. 7). Сопротивления резисторов не изменились. Для этого случая определите падение напряжения на диоде и силу тока, текущего через миллиамперметр. В обоих случаях миллиамперметр считайте идеальным.

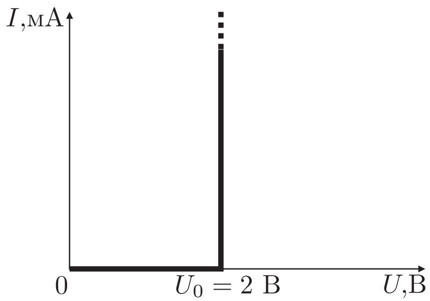


Рис. 5

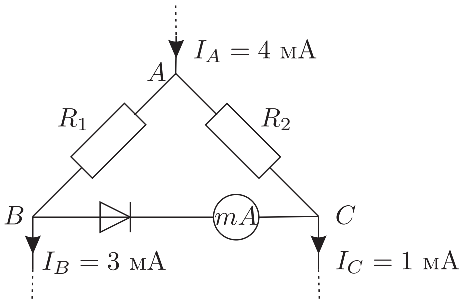


Рис. 6

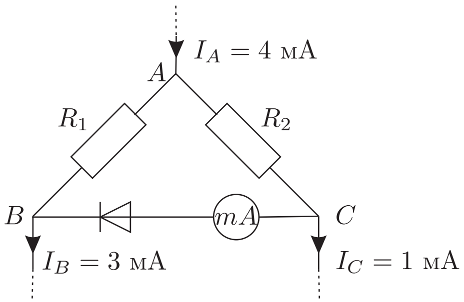


Рис. 7

Задача 5. Потерянное зеркало

В архиве Снеллиуса нашли чертеж, на котором были изображены два плоских зеркала M_1 и M_2, образующие двугранный угол φ, точечный источник света S и область AOB (она заштрихована), из которой можно было видеть одновременно оба изображения источника. От времени чернила выцвели, и невозможно стало разглядеть, как расположено зеркало M_2 и точечный источник S (рис. 8).

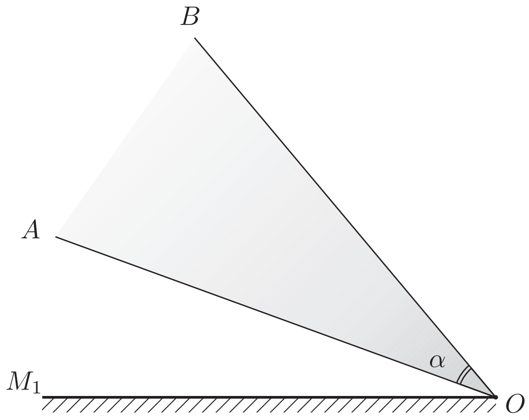


Рис. 8

Восстановите по имеющимся данным с помощью циркуля и линейки без делений положение зеркала M_2 и геометрическое место точек, где бы мог находиться источник S. Зеркала считайте полубесконечными.

Вычислите угол φ между плоскостями зеркал, если $\angle AOB = \angle\alpha = 30°$.

10 класс

Задача 1. Платформа

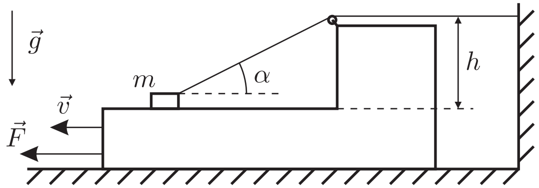


Рис. 9

На платформе с прямоугольным выступом высотой h лежит небольшое тело массой m. К нему прикреплён один конец невесомой нерастяжимой нити, перекинутой через идеальный блок, установленный на выступе платформы (рис. 9). Второй конец нити закреплён на вертикальной стене так, что участок нити между блоком и стеной горизонтален.

Платформу перемещают от стены с постоянной скоростью v. С какой силой F нужно тянуть платформу в тот момент, когда участок нити над платформой составляет угол α с горизонтом? Сила F горизонтальна и лежит в плоскости рисунка. Коэффициент трения между телом и платформой μ, между платформой и полом трения нет. Считайте, что во время движения груз от платформы, а платформа от пола не отрываются.

Задача 2. Вращающаяся трубка

Замкнутая стеклянная трубка с отводом, погружённым в открытый сверху сосуд со ртутью, в верхней своей части содержит столбик воздуха. Его границы со ртутью находятся на расстоянии R от оси симметрии системы (рис. 10). Определите, с какой угловой скоростью нужно вращать систему вокруг этой оси, чтобы давление воздуха изменилось в n раз. Начальное давление воздуха p_0, плотность ртути ρ, её уровень в сосуде можно считать неизменным.

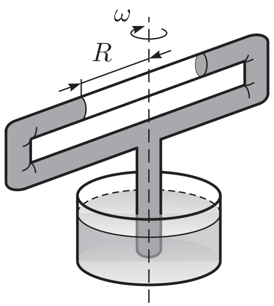


Рис. 10

Задача 3. Монотонный процесс

Один моль идеального газа переводят из состояния с известным давлением p_1 и известным объёмом V_1 в состояние с давлением $0{,}75p_1$ и объёмом $V_2 > V_1$. Зависимость $p(V)$ в этом процессе является линейной функцией (рис. 11).

При каких значениях конечного объёма V_2 температура в данном процессе изменяется монотонно?

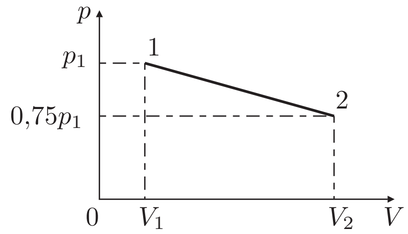


Рис. 11

Задача 4. Разлёт трёх заряженных частиц

Три частицы с одинаковыми зарядами в начальный момент удерживают в вершинах треугольника со сторонами R_1, R_2 и R_3 (рис. 12). Частицы одновременно отпускают, и они разлетаются так, что отрезки, соединяющие любую пару частиц остаются параллельными исходным. Каково отношение масс этих частиц $m_1 : m_2 : m_3$? Гравитационным притяжением пренебречь.

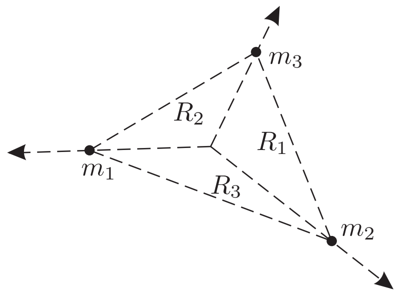


Рис. 12

Задача 5. Нелинейный элемент

К электрической цепи (рис. 13), составленной из одинаковых резисторов $R = 1$ Ом, нелинейного элемента с неизвестной вольт-амперной характеристикой и идеального амперметра, подключён источник, напряжение которого можно изменять. Зависимость показаний амперметра от напряжения источника задана (рис. 14). Положительное направление тока указано на рис. 13. Восстановите по этим данным вольт-амперную характеристику нелинейного элемента (зависимость силы тока через элемент от напряжения на нём).

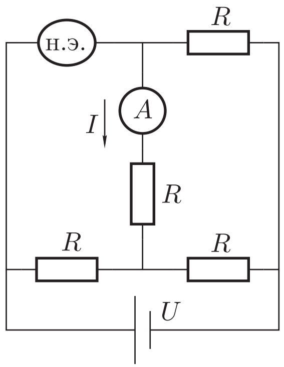


Рис. 13

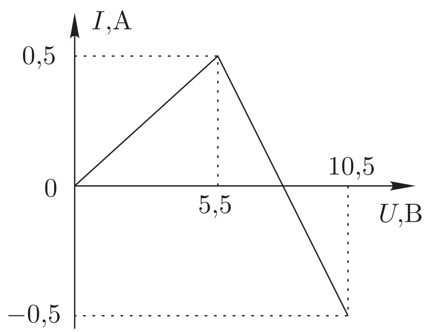


Рис. 14

11 класс

Задача 1. Пакет с мукой

Бумажный пакет с мукой падает без начальной скорости с высоты $h = 4$ см на чашку пружинных весов. Стрелка весов отклонилась до отметки $m_1 = 6$ кг и, после того, как колебания прекратились, стала показывать массу $m_0 = 2$ кг. Жёсткость пружины $k = 1{,}5$ кН/м. Найти массу M чашки.

Примечание. Ускорение свободного падения принять равным $g = 10$ м/с^2.

Задача 2. Магнетизм

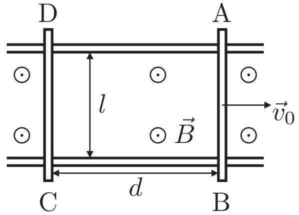


Рис. 15

По двум параллельным горизонтальным направляющим (рис. 15), расположенным на расстоянии l друг от друга, могут перемещаться без трения два металлических стержня AB и CD, имеющие массу m и электрическое сопротивление R каждый. Однородное магнитное поле индукции B направлено перпендикулярно плоскости направляющих. В начальный момент времени стержни расположены на расстоянии d друг от друга и перпендикулярны направляющим. Стержень CD неподвижен, а стержню AB сообщена скорость v_0, параллельная направляющим, в направлении от CD.

1. На каком расстоянии друг от друга будут находиться стержни через большой промежуток времени?

2. Сколько теплоты выделится в этой системе через большой промежуток времени?

Сопротивлением направляющих можно пренебречь.

Задача 3. Диполь в электрическом поле

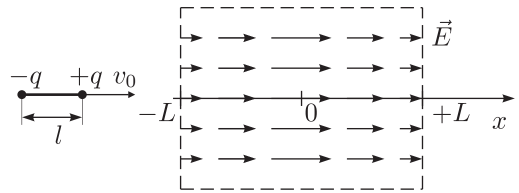


Рис. 16

Диполь представляет собой два точечных заряда $+q$ и $-q$, закреплённых на расстоянии l друг от друга. Масса диполя m. Диполь ориентирован вдоль оси x и влетает со скоростью v_0 в область длиной $2L \gg l$ (рис. 16). В этой области вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}$ везде направлен вдоль оси x, а его модуль изменяется по закону $E(x) = E_0\left(1 - \dfrac{x^2}{L^2}\right)$. Найдите зависимость силы F, действующей на диполь, от его координаты x, максимальную скорость диполя, а также время пролёта области $2L$. Считайте, что ориентация диполя в пространстве не меняется.

Примечание. Такое электрическое поле можно создать между пластинами плоского конденсатора с помощью распределённого объёмного заряда.

Задача 4. Линейный процесс

Один моль идеального многоатомного газа переводят из состояния B, в котором температура равна $t_B = 217\ ^\circ C$ в состояние D так, что давление линейно зависит от объема, температура монотонно убывает, а к газу на протяжении всего процесса подводят тепло (рис. 17).

Найдите максимально возможную работу A_m, которую может совершить этот газ в таком процессе.

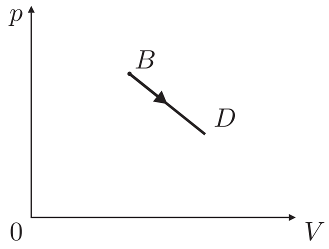


Рис. 17

Задача 5. Линзы в круг

Говорят, что в архиве Снеллиуса нашли рукопись в которой обсуждалось, как может идти луч через систему из N одинаковых линз, оптические центры которых лежат на окружности, а их плоскости перпендикулярны этой окружности и проходят через её центр. От времени чернила выцвели и на схеме остались видны только следы от плоскостей двух соседних линз и фокус одной из них (рис. 18). Из текста следовало, что луч, преломляясь в каждой из линз, идёт по сторонам правильного N–угольника. Вид линзы и её диаметр D приведены на рис. 19.

1. Какие это могли быть линзы – собирающие или рассеивающие?

Построением (с помощью циркуля и линейки без делений) восстановите:

2. положение ещё двух линз (слева и справа от изображенных на рисунке плоскостей линз);

3. возможные положения оптических центров четырёх получившихся линз;

4. возможный ход луча через эти линзы.

Ответ обоснуйте.

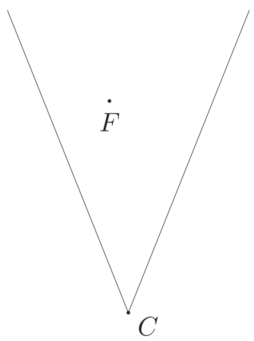


Рис. 18

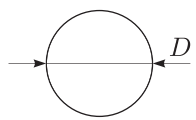


Рис. 19

Возможные решения
9 класс

Задача 1. Поплавок в ракете

Сила Архимеда зависит от ускорения системы. Действительно, если мысленно заменить водой погруженную в воду часть тела и записать для неё второй закон Ньютона, то получится $V_{\text{погр}}\rho_0\ a = F_A - V_{\text{погр}}\rho_0 g$, где F_A — сила, действующая со стороны окружающей жидкости на погружённый объём, откуда

$$F_A = V_{\text{погр}}\rho_0(g + a).$$

1. Условие равновесия поплавка в неподвижной ракете

$$0 = (V - zS)\rho_0 g - V\rho g - kx_0, \tag{1}$$

где V — объём поплавка, z — высота выступающей над поверхностью воды части.

Предположим, что при ускоренном движении глубина погружения поплавка не изменилась, тогда второй закон Ньютона для поплавка примет вид:

$$V\rho a = (V - zS)\rho_0(g + a) - V\rho g - kx_0. \tag{2}$$

Сравнивая (2) с (1), видим, что последнее равенство возможно лишь при отсутствии ускорения или при увеличении x_0. Значит, предположение неверно, поплавок всплывёт.

2. Пусть искомое изменение глубины равно x. Запишем второй закон Ньютона для поплавка в проекции на вертикальную ось при ускоренном движении:

$$V\rho a = (V - zS - xS)\rho_0(g + a) - V\rho g - k(x_0 + x). \tag{3}$$

Подставив выражение для $(V - zS)$ из уравнения (1) в уравнение (3), получим

$$kx_0 a = kxg + \rho_0(g + a)xSg.$$

Окончательно,

$$x = x_0\frac{ka}{(k + \rho_0 S(g + a))g}.$$

3. При ускорении $a = 3g$ найдём

$$x = 2{,}14\ \text{см}.$$

Задача 2. Пружина и шарик

На первом участке падения (до касания пружины $L_0 < h < H$) кинетическая энергия шарика равна уменьшению его потенциальной энергии:

$$E_{\text{к}} = mg(H - h).$$

Таким образом, по наклону начального линейного участка графика находим:

$$mg = \frac{\Delta E_\text{к}}{\Delta h} = 5 \text{ Н}, \qquad \text{откуда} \qquad m = 0{,}5 \text{ кг}.$$

Длину пружины L_0 определим по значению h, при котором нарушается линейный характер зависимости $E_\text{к}(h)$.

$$L_0 = 1{,}5 \text{ м}.$$

После контакта шарика с пружиной уменьшение его потенциальной энергии равно сумме кинетической энергии шарика и потенциальной энергии деформированной пружины:

$$mg(H-h) = \frac{k(L_0-h)^2}{2} + E_k. \tag{4}$$

Мы получили квадратное уравнение относительно h. Максимум квадратичной функции вида $\left(y = ax^2 + bx + c\right)$ достигается при $x_m = -b/(2a)$.

Следовательно, в уравнении (4) значение h_m, при котором кинетическая энергия шарика максимальна, определяется выражением:

$$h_m = L_0 - \frac{mg}{k}. \tag{5}$$

Из графика видно, что максимум кинетической энергии достигается при

$$h_m = 1{,}375 \text{ м}. \tag{6}$$

Приравнивая (5) и (6), находим $k = 40$ Н/м.

Задача 3. Предварительный подогрев

Заметим, что мощность тепловых потерь стакана $N_1 = \alpha S(t_i - t_1)$, где S — площадь внешней поверхности стакана, t_i — температура жидкости в стакане, α — коэффициент пропорциональности.

Запишем уравнение теплового баланса для первого стакана:

$$Q_1 = m_1 C\Delta t_1 = (N_0 - N_1)\tau_1 \approx N_0\tau_1, \tag{7}$$

где N_0 — мощность нагревателя, C — удельная теплоёмкость жидкости в стакане, $m_1 = \rho V_1$ — масса жидкости, находящейся в первом стакане. Тепловыми потерями пренебрегаем из-за малой разности температур.

Когда процесс теплообмена установится, то:

$$N_0 = N_1, \qquad \text{или} \qquad N_0 = \alpha S_1(t_2 - t_1). \tag{8}$$

Аналогичным образом для второго случая запишем:

$$Q_2 = m_2 C\Delta t_2 \approx (N_0 - \alpha S_2(t_3 - t_1))\tau_2, \tag{9}$$

$$N_0 = \alpha S_2(t_4 - t_1). \tag{10}$$

Из свойств подобия следует, что $S \sim l^2$, $V \sim l^3$, откуда $S_2 = 4S_1$, $m_2 = 8m_1$. Из (8) и (10) получим:

$$S_1(t_2 - t_1) = 4S_1(t_4 - t_1), \qquad \text{или} \qquad t_4 = 25^\circ\text{C}.$$

Из (8) следует:

$$\alpha S_1 = \frac{N_0}{t_2 - t_1}. \tag{11}$$

Искомое время τ_2 найдём из (9) с учётом (7):

$$\tau_2 \approx \frac{8m_1 C\Delta t_2}{N_0 - 4\alpha S_1(t_3 - t_1)}; \tag{12}$$

$$\tau_1 \approx \frac{m_1 C\Delta t_1}{N_0}. \tag{13}$$

Поделив почленно (12) на (13), с учётом (11), получим:

$$\tau_2 \approx \tau_1 \left[\frac{8\Delta t_2}{\Delta t_1}\frac{t_2 - t_1}{(t_2 - t_1) - 4(t_3 - t_1)}\right] \approx 20 \text{ с}.$$

Задача 4. Диод

Пусть I – сила тока, текущего через диод.

1. Предположим, что диод заперт ($I = 0$). Тогда сила тока, текущего через резистор R_2 равна $I_C = 1$ мА, а через резистор R_1, соответственно $I_B = 3$ мА. В этом случае напряжение U на диоде равно $I_B R_1 - I_C R_2 = 13$ В.

При такой полярности диод заперт и ток через него не течет, как мы и предполагали.

2. Полярность подключения диода изменили (рис. 20), поэтому он не может быть заперт. Через диод течёт ток I и напряжение на нем равно $U_0 = 2$ В.

Для силы токов каждой из ветвей выполняются соотношения:

$$I_B = I_{AB} + I, \qquad I_{AC} = I + I_C, \tag{14}$$

для напряжений:

$$R_1 I_{AB} = R_2 I_{AC} + U_0. \qquad (15)$$

Отсюда,

$$R_1(I_B - I) = R_2(I_C + I) + U_0,$$

$$I = \frac{R_1 I_B - R_2 I_C - U_0}{R_1 + R_2} = 1 \text{ мА}.$$

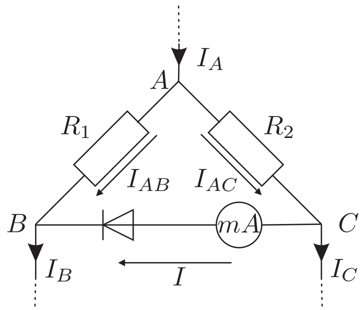


Рис. 20

Задача 5. Потерянное зеркало

Зеркала, по условию, образуют двугранный угол. Область, из которой видны оба изображения источника, содержит точку O каждого зеркала. Значит, зеркала пересекаются в точке O. Область, из которой видно изображение источника S в зеркале M_1, ограничивается лучом OB (если бы она ограничивалась лучом OA, в области AOB не было бы видно изображения в этом зеркале). Значит, изображение источника в зеркале M_1 находится на продолжении прямой BO за точку O (рис. 21). Аналогично, изображение источника в зеркале M_2 находится на продолжении прямой AO за точку O.

Геометрическое место точек, где мог бы находитья источник — это луч OC, получающийся отражением луча OB_1 в зеркале M_1 ($\angle B_1OM_1 = \angle COM_1$).

Поскольку источник S, лежащий на луче OC, при отражении в зеркале M_2 должен попасть на луч OA_1, то зеркало OM_2 лежит на биссектрисе угла $\angle COA_1$.

На рисунке для некоторого положения источника S показаны положения его изображений в зеркалах M_1 и M_2.

Луч OA_1 — это изображение луча OC в зеркале M_2. При повороте зеркала M_2 на угол φ, изображение луча OC повернётся на угол 2φ. При этом плоскость зеркала M_2 перейдёт в плоскость зеркала M_1, а луч OA_1 перейдёт в луч OB_1. Значит,

$$\angle A_1OB_1 = 2\varphi = \angle AOB = 30^\circ, \qquad \text{откуда} \qquad \varphi = 15^\circ.$$

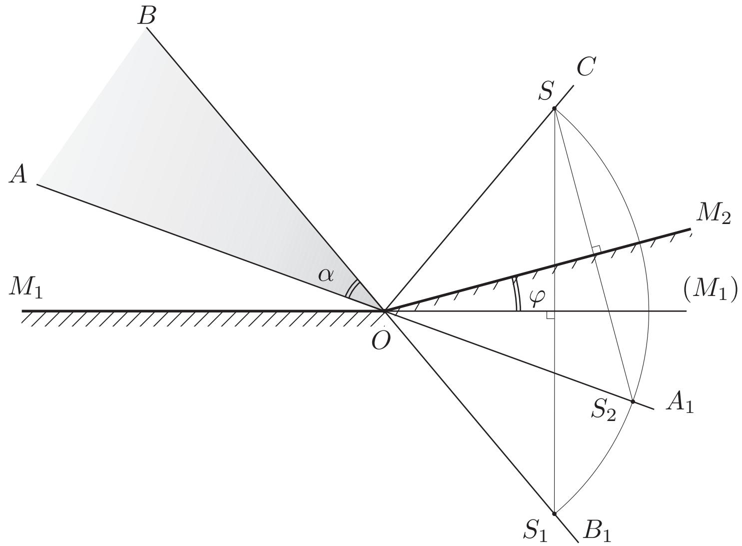


Рис. 21

10 класс

Задача 1. Платформа

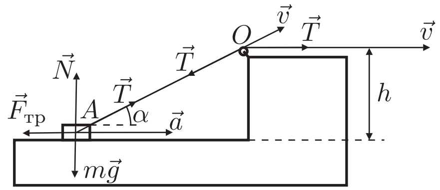


Рис. 22

Будем решать задачу в системе отсчета, связанной с платформой (рис. 22). Здесь стенка удаляется от платформы с постоянной скоростью v, а тело движется по платформе со скоростью $v_a = v/\cos\alpha$, так как проекция скорости точки A на отрезок нити AO равна v. Определим ускорение, с которым движется тело по платформе. Относительно точки O точка A движется по окружности радиуса $l = h/\sin\alpha$ со скоростью $v'_A = v_A \cdot \sin\alpha = v \cdot \text{tg}\alpha$. Центростремительное ускорение точки A направлено вдоль AO к точке O и равно $a_n = v^2\text{tg}^2\alpha/l$. Полное ускорение точки A направлено горизонтально и равно

$$a = \frac{a_n}{\cos\alpha} = \frac{v^2\text{tg}^2\alpha}{l\cos\alpha} = \frac{v^2}{h}\text{tg}^3\alpha.$$

Теперь рассмотрим действующие на тело силы. В проекции на горизонтальную ось

$$ma = T\cos\alpha - \mu N,$$

на вертикальную

$$N + T\sin\alpha - mg = 0.$$

Отсюда,

$$N = mg - T\sin\alpha, \qquad T = \frac{m(a+\mu g)}{cos\alpha + \mu sin\alpha},$$

$$N = \frac{m(g\cos\alpha - a\sin\alpha)}{\cos\alpha + \mu\sin\alpha}.$$

Отметим сразу, что движение по платформе без отрыва от нее возможно только при $\alpha \leqslant \operatorname{arctg}(a/g)$.

Сила, которую необходимо прикладывать к платформе,

$$F = \mu N + T(1 - \cos\alpha).$$

Подставляя N и T, получаем:

$$F = m\left(\frac{a+\mu g}{\cos\alpha + \mu\sin\alpha} - a\right) = m\left(\frac{v^2\mathrm{tg}^3\alpha + \mu gh}{h(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)} - \frac{v^2}{h}\mathrm{tg}^3\alpha\right).$$

Задача 2. Вращающаяся трубка

Выделим небольшой участок ртути длиной Δl, находящийся на расстоянии l от оси вращения (рис. 23). Масса этого участка $\Delta m = \rho\Delta lS$, где S — площадь поперечного сечения трубки. Пусть p_1 — давление ртути на правой границе участка, p_2 — на левой, $\Delta p = p_2 - p_1$. Рассматримаевый участок движется с центростремительным ускорением $a = \omega^2 l$. По второму закону Ньютона:

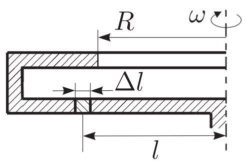


Рис. 23

$$\Delta m\omega^2 l = (p_2 - p_1)\,S = \Delta pS, \qquad \text{откуда} \qquad \Delta p = \rho\omega^2 l\Delta l.$$

На рис. 24 представлен график зависимости $\Delta p/\Delta l$ от расстояния до оси вращения l. Изменение давления при перемещении от $l = 0$ до $l = r$ есть площадь треугольника под этим графиком:

$$p(r) - p(0) = \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2. \qquad (16)$$

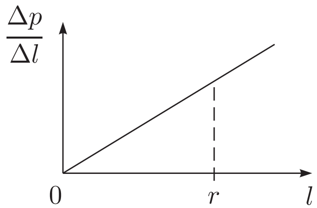


Рис. 24

Давление воздуха после раскручивания $p = np_0$. Поскольку температура воздуха сохраняется, то $pr = p_0 R$, где r — новое расстояние от центра вращения до границы воздуха со ртутью. Подставив эти условия в уравнение (16), получим:

$$(n-1)\,p_0 = \frac{1}{2}\rho\omega^2\frac{R^2}{n^2}, \qquad \text{откуда} \qquad \omega = \frac{n}{R}\sqrt{\frac{2p_0(n-1)}{\rho}}.$$

Задача 3. Монотонный процесс

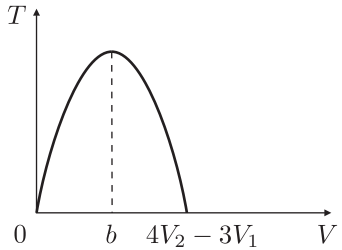


Рис. 25

Уравнение линейного процесса:

$$p = p_1 - (V - V_1)\beta,$$

где β — модуль углового коэффициента наклона прямой.

$$p(V_2) = 0{,}75p_1,$$

$$\beta = \frac{p_1}{4(V_2 - V_1)}.$$

Поэтому

$$p = p_1 - \frac{p_1}{4}\frac{V - V_1}{V_2 - V_1}. \qquad (17)$$

Из уравнения Менделеева — Клапейрона

$$pV = \left(p_1 - \frac{p_1}{4}\frac{V - V_1}{V_2 - V_1}\right)V = RT, \qquad (18)$$

видно, что температура зависит от объёма как

$$T = k(4V_2 - 3V_1 - V)V, \qquad (19)$$

где коэффициент пропорциональности $k = p_1/(4(V_2 - V_1))$. Уравнение (19) — парабола (рис. 25) с вершиной $b = (4V_2 - 3V_1)/2$. По условию температура должна меняться монотонно. Возможны два случая: возрастание или убывание температуры в течение всего процесса.

Рассмотрим случай, когда температура возрастает. Это означает, что объёмы V_1 и V_2 принадлежат отрезку $[0; b]$:

$$\frac{4V_2 - 3V_1}{2} \geqslant V_2 > V_1 \geqslant 0,$$

$$V_2 \geqslant 3V_1/2.$$

При убывании температуры объёмы V_1 и V_2 принадлежат отрезку $[b; 2b]$:

$$\frac{4V_2 - 3V_1}{2} \leqslant V_1 < V_2 \leqslant 4V_2 - 3V_1,$$

$$V_1 < V_2 \leqslant 5V_1/4.$$

Задача 4. Разлёт трёх заряженных частиц

В любой момент времени отношение расстояний между частицами $r_1 : r_2 : r_3$ остается равным отношению исходных расстояний $R_1 : R_2 : R_3$, поскольку конфигурации частиц являются подобными треугольниками. По этой же причине углы α_1, α_2, α_3 при вершинах m_1, m_2, m_3 остаются неизменными (рис. 26). Рассмотрим две сходственные стороны треугольников, например, R_3 и r_3. Проведём к ним перпендикуляр ON. Стороны параллельны, если проекции скоростей и ускорений частиц m_1 и m_2 на ON равны, это обусловлено тем, что частицы с массами m_1 и m_2 взаимодействуют лишь с зарядом частицы массой m_3. Исходя из закона Кулона и второго закона Ньютона можно получить выражения для ускорений и их проекций:

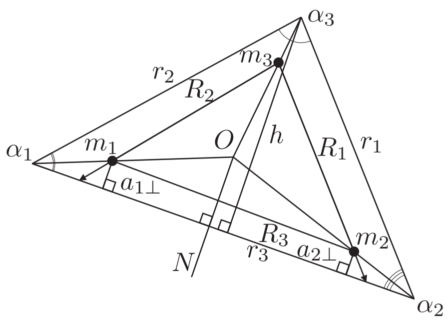


Рис. 26

$$a_{1\perp} = \frac{kq^2 \sin\alpha_1}{m_1 r_2^2} = a_{2\perp} = \frac{kq^2 \sin\alpha_2}{m_2 r_1^2}.$$

Высота h треугольника, опущенная на сторону r_3, равна:

$$h = r_2 \sin\alpha_1 = r_1 \sin\alpha_2.$$

Поэтому из предшествующего равенства следует

$$\frac{1}{m_1 r_2^3} = \frac{1}{m_2 r_1^3},$$

откуда

$$m_1 : m_2 = r_1^3 : r_2^3.$$

Аналогичным образом найдём отношение масс $m_2 : m_3 = r_2^3 : r_3^3$. Следовательно, $m_1 : m_2 : m_3 = r_1^3 : r_2^3 : r_3^3$.

Задача 5. Нелинейный элемент

Определим силу тока и напряжение на элементе при силе тока I через амперметр и напряжении $U_{AB} = U$ на входе цепи.

Пусть $U_{DB} = U_3$, $U_{CB} = U_1$, $U_{AD} = U_2 = U - U_3$, $U_{CD} = IR$ (рис. 27). Тогда для суммы токов в узле D:

$$I + I_2 - I_3 = 0,$$

откуда

$$\frac{U - U_3}{R} + I = \frac{U_3}{R},$$

$$U_3 = \frac{U + IR}{2}. \tag{20}$$

Сила тока через элемент с учётом (20):

$$I_Э = I + I_1 = I + \frac{U_1}{R} = I + \frac{IR + U_3}{R} = \frac{5}{2} I + \frac{U}{2R}. \tag{21}$$

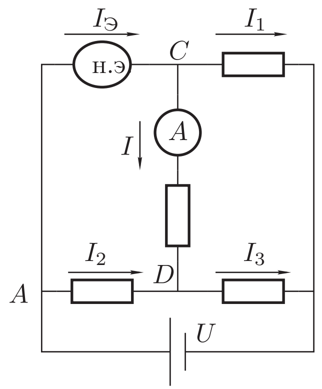


Рис. 27

Напряжение на элементе:

$$U_Э = U - IR - U_3 = \frac{U - 3IR}{2}. \tag{22}$$

Рассмотрим участок зависимости $I(U)$ в диапазоне напряжений от $U = 0$ В до $U = 5{,}5$ В. Так как на этом участке сила тока нелинейного элемента линейно зависит от напряжения и зависимости (20) и (21) линейны, то график $I_э(U_э)$ — прямая. Для построения прямой достаточно двух точек:

$$U = 0 \text{ В}, \quad I_э = 0 \text{ А}, \quad U_э = 0 \text{ В}$$

$$U = 5{,}5 \text{ В}, \quad I_э = 4 \text{ А}, \quad U_э = 2 \text{ В}.$$

Аналогично для участка от $U = 5{,}5$ В до $U = 10{,}5$ В. Сила тока не зависит от напряжения вплоть до $U_Э = 6$ В из (22).

Окончательно, зависимость $I_Э(U_Э)$ выглядит так (рис. 28):

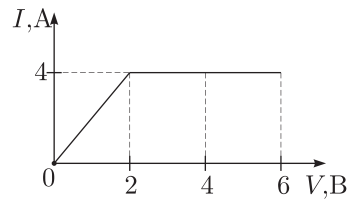


Рис. 28

11 класс

Задача 1. Пакет с мукой

Пусть m – масса пакета.

Его скорость непосредственно перед ударом равна $v = \sqrt{2gh}$. Удар абсолютно неупругий. Поэтому скорости пакета и чашки сразу после удара одинаковы и равны

$$V = \frac{m}{m + M} v.$$

До удара на пружине висела только чашка, поэтому удлинение пружины было равно

$$x_1 = \frac{Mg}{k}.$$

В момент максимального отклонения удлинение равно

$$x_2 = \frac{Mg}{k} + \frac{m_1 g}{k}.$$

Запишем закон сохранения энергии для момента времени сразу после удара и в момент максимального отклонения:

$$\frac{(M+m)V^2}{2} + \frac{kx_1^2}{2} = \frac{kx_2^2}{2} - (M+m)g(x_2 - x_1).$$

После того как наступит равновесие, весы будут показывать массу пакета с мукой. Поэтому $m = m_0$.

$$\frac{(M+m_0)\cdot 2gh\cdot\left(\frac{m_0}{M+m_0}\right)^2}{2} + \frac{k\cdot M^2g^2}{2k^2} = \frac{k\cdot\left(\frac{Mg}{k}+\frac{m_1 g}{k}\right)^2}{2} - (M+m_0)\cdot g\cdot\frac{m_1 g}{k}.$$

После упрощения получаем

$$M = \frac{2km_0^2 h}{m_1 g(m_1 - 2m_0)} - m_0 = 2\ \text{кг}.$$

Задача 2. Магнетизм

При изменении площади контура $ABCD$, образованного стержнями и направляющими, из-за возникающей ЭДС индукции в системе течёт электрический ток (рис. 29). Силы Ампера действует таким образом, что тормозят стержень AB и разгоняют CD. При выравнивании скоростей v_{AB} и v_{CD} магнитный поток через контур $ABCD$ перестаёт изменяться, исчезает ЭДС индукции и индуктивный ток, а с ними и силы Ампера. С этого момента стержни движутся с равными и одинаковыми скоростями.

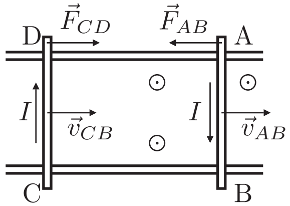


Рис. 29

За малый промежуток времени Δt изменение площади контура

$$\Delta S = (v_{AB} - v_{CD})l\Delta t,$$

изменение магнитного потока

$$\Delta\Phi = B\Delta S = B(v_{AB} - v_{CD})l\Delta t,$$

ЭДС индукции

$$|\mathscr{E}_{\text{и}}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B(v_{AB} - v_{CD})l,$$

ток в контуре

$$I_{AB} = I_{CD} = \frac{|\mathscr{E}_{\text{и}}|}{2R} = \frac{B(v_{AB} - v_{CD})l}{2R},$$

силы Ампера

$$F_{AB} = F_{CD} = \frac{B^2 l^2 (v_{AB} - v_{CD})}{2R},$$

ускорения стержней направлены противоположно и равны

$$a = \frac{B^2 l^2 (v_{AB} - v_{CD})}{2mR}.$$

С учётом направления ускорения

$$\frac{\Delta v_{AB}}{\Delta t} = -\frac{B^2 l^2 (v_{AB} - v_{CD})}{2mR},$$

$$\frac{\Delta v_{CD}}{\Delta t} = \frac{B^2 l^2 (v_{AB} - v_{CD})}{2mR}.$$

Домножая обе части уравнений на Δt и учитывая, что $(v_{AB} - v_{CD})\Delta t = \Delta d$ - изменение расстояния между стержнями, получаем

$$\Delta v_{AB} = -\frac{B^2 l^2}{2mR}\Delta d,$$

$$\Delta v_{CD} = \frac{B^2 l^2}{2mR}\Delta d.$$

Тогда

$$v_{AB} = v_0 - \frac{B^2 l^2}{2mR}\Delta d,$$

$$v_{CD} = \frac{B^2 l^2}{2mR}\Delta d.$$

При выравнивании скоростей

$$v_0 - \frac{B^2 l^2}{2mR}\Delta d = \frac{B^2 l^2}{2mR}\Delta d,$$

отсюда

$$\Delta d = \frac{mv_0 R}{B^2 l^2}.$$

Окончательно установившееся расстояние между стержнями

$$d' = d + \Delta d = d + \frac{mv_0R}{B^2l^2}.$$

Скорости при этом

$$v_{AB} = v_{CD} = v_0/2.$$

В системе выделится теплота

$$Q = \frac{mv_0^2}{2} - 2\frac{m(v_0/2)^2}{2} = \frac{mv_0^2}{4}.$$

Задача 3. Диполь в электрическом поле

Сила, действующая на диполь со стороны электрического поля, является суммой сил, действующих на заряды $+q$ и $-q$. Пусть координата центра диполя x, тогда

$$F_x(x) = qE(x + l/2) - qE(x - l/2) = q\frac{dE}{dx}l = -2qlE_0\frac{x}{L^2}.$$

Запишем второй закон Ньютона для диполя:

$$m\ddot{x} = F(x) = -2\frac{qlE_0}{L^2}x.$$

Полученное уравнение имеет вид уравнения гармонических колебаний с циклической частотой ω:

$$\omega = \sqrt{2\frac{qlE_0}{mL^2}}.$$

Его решение можно записать в виде:

$$x(t) = A\cos(\omega t + \varphi), \qquad v(t) = -A\omega\sin(\omega t + \varphi).$$

Постоянные A и ω найдём из начальных условий:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{v_0}{\omega L} + \pi, \qquad A = L\sqrt{1 + \left(\frac{v_0}{\omega L}\right)^2}.$$

Зная уравнение движения, можно найти наибольшую скорость диполя:

$$v_{max} = A\omega = \sqrt{v_0^2 + 2\frac{qlE_0}{m}}.$$

Фазу колебаний в момент, когда диполь покинет область поля, найдём из тригонометрии:

$$\varphi_1 = 2\pi - \operatorname{arctg}\frac{v_0}{\omega L}.$$

Зная начальную и конечную фазу, можно найти время пролёта:

$$t = \frac{\varphi_1 - \varphi}{\omega} = \frac{1}{\omega}\left(\pi - 2\operatorname{arctg}\frac{v_0}{\omega L}\right).$$

Задача 4. Линейный процесс

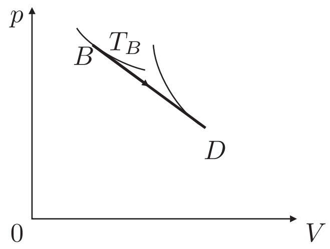


Рис. 30

Запишем уравнение линейного процесса BD в виде $p(V) = p_D + k(V - V_D)$, где p_D и V_D есть давление и объём газа в состоянии D, соответственно. Отсюда, $k = -\dfrac{p_D}{V_0 - V_D}$, где V_0 – точка пересечения прямой BD с осью объёмов. Процесс прекращается в точке D, где данной прямой касается адиабата (теплота подводится) (рис. 30). Условием касания адиабаты и прямой является совпадение коэффициентов наклона в точке D.

Уравнение адиабаты:

$$pV^\gamma = p_DV_D{}^\gamma.$$

Продифференцируем уравнение адиабаты и найдем угловой коэффициент в точке D:

$$p = \frac{p_DV_D{}^\gamma}{V^\gamma},$$

$$p'(V_D) = -\gamma\frac{p_DV_D{}^\gamma}{V_D{}^{\gamma+1}} = -\gamma\frac{p_D}{V_D}.$$

Приравнивая $p'(V_D) = k$, при $\gamma = 4/3$ (газ многоатомный), получим $V_D = 4V_0/7$.

Чтобы работа была максимальной, необходимо прямую BD проводить как можно более полого. В пределе это будет касательная к изотерме в точке B. Аналогично находим

$$V_B = \frac{V_0}{2}.$$

Далее,

$$p_D = 2p_B - \frac{p_B}{V_B}V_D = \frac{6}{7}p_B.$$

Максимальная работа равна

$$A_m = \frac{1}{2}(p_B + p_D)(V_D - V_B) = \frac{1}{2}p_BV_B\left(1 + \frac{6}{7}\right)\left(\frac{8}{7} - 1\right) = \frac{13}{98}RT_B = 540{,}15\ \text{Дж},$$

где $T_B = 490$ К.

Задача 5. Линзы в круг

1. По условию плоскости линз образуют правильный многоугольник. Из центра C проводим два луча (CD и CE), образующие с ближайшими прямыми (CA и CB) углы $\alpha = 2\pi/N$. Это и будут проекции плоскостей линз на плоскость рисунка.

2. Предположим, что фокус F принадлежит левой линзе. Проведем через него перпендикуляр к этой линзе (рис. 31). Точка пересечения перпендикуляра с плоскостью линзы даст положение её оптического центра O. Отметим на остальных плоскостях оптические центры линз.

3. Многоугольник правильный, поэтому ход луча относительно плоскости линзы симметричен. Из формулы для тонкой собирающей линзы следует, что при таком ходе луч пересекает главную оптическую ось линзы на двойном фокусном расстоянии. Если же линза рассеивающая, то точку двойного фокуса пересечёт воображаемое продолжения луча. Откладываем на главных оптических осях каждой двойные фокусные расстояния. Луч, идущий через двойные фокусы, лежащие внутри ACB, пойдёт относительно точки C дальше оптических центров линз. Это соответствует собирающей линзе. Луч, идущий через двойные фокусы, лежащие снаружи ACB, пойдёт относительно точки C ближе оптических центров линз. Это соответствует рассеивающей линзе. Пусть эти лучи пересекают плоскости линз (CA и CB) в точках A_1, B_1 и A_2, B_2. Откладывая от центра C отрезки длиной CB_1, мы восстановим точки, через которые пройдёт искомый луч, если линзы собирающие. Если откладывать от центра C отрезки длиной CB_2, мы восстановим точки, через которые пройдёт искомый луч, если линзы рассеивающие. Убеждаемся, что в обоих случаях луч проходит сквозь линзы (её радиус равен $D/2$).

4. Теперь предположим, что фокус F относится к правой линзе. Выполнив все построения аналогично ранее рассмотренному случаю, убеждаемся, что луч пройдёт мимо линз (на расстоянии большем её радиуса $D/2$).

5. Итак, возможны два варианта. Линза может быть собирающей и рассеивающей. Фокус F принадлежит левой линзе.

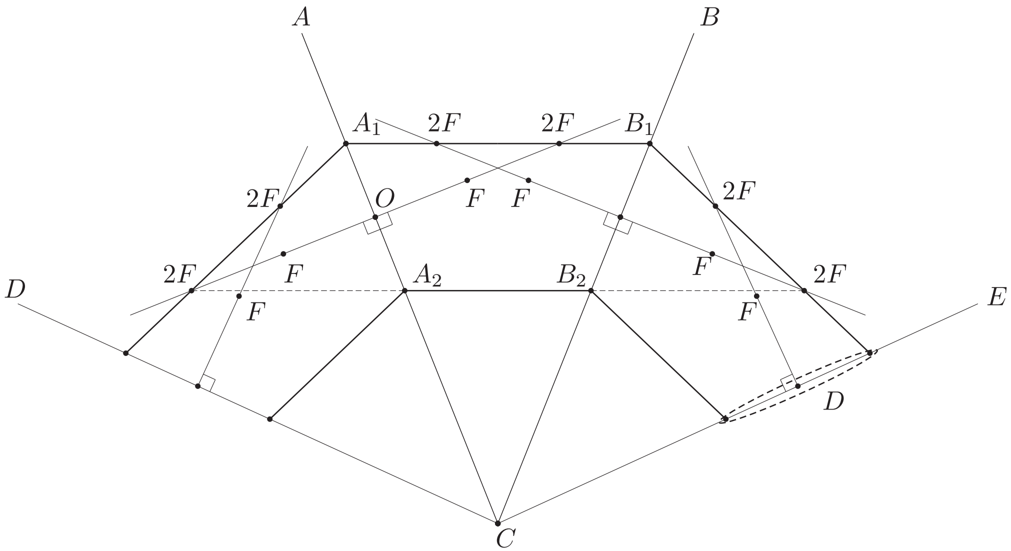


Рис. 31

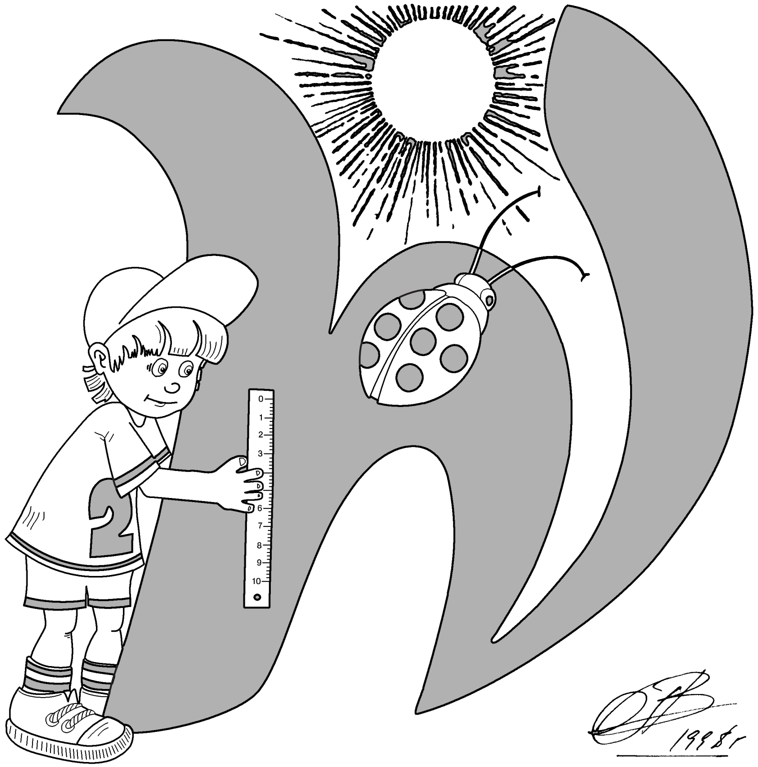
**Методическая комиссия по физике
при центральном оргкомитете
Всероссийских олимпиад школьников**

XLVI Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



Саранск, 2012 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике
при центральном оргкомитете Всероссийских олимпиад школьников
Телефоны: (495) 408-80-77, 408-86-95.
E-mail: **physolymp@gmail.com**

Авторы задач

9 класс	10 класс	11 класс
1. Замятнин М., Сабаев С.	1. Сабаев С., Слободянин В.	1. Костарев В.
2. Подлесный Д., Радайкин В.	2. Гуденко А.	

Общая редакция — Ко́зел С., Слободянин В.

Оформление и вёрстка — Паринов Д., Цыбров Ф.

При подготовке оригинал-макета
использовалась издательская система $\LaTeX 2_\varepsilon$.

Подписано в печать 3 июля 2013 г. в 16:29.

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

9 класс

Задача 1. «Чёрный ящик-1»

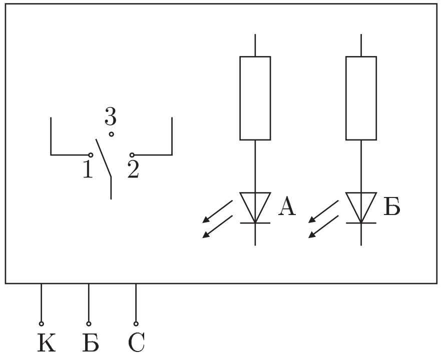


Рис. 1

В «чёрном ящике» с тремя выводами («К» — красный, «С» — синий, «Б» — белый) собрана электрическая цепь, состоящая из двух батареек, двух одинаковых светодиодов, размещённых на корпусе ящика, а также переключателя, который может находиться в трёх положениях (рис. 1). В центральном положении 3 все контакты переключателя разомкнуты.

Полупроводниковый светодиод – это устройство, которое пропускает электрический ток только в одном направлении и излучает при этом свет. Если светодиод включить в обратном направлении, ток через него течь не будет.

1. Расшифруйте и нарисуйте схему «чёрного ящика» без определения номиналов элементов. (Для выполнения этого пункта пользоваться мультиметрами не обязательно). Объясните ход вашего решения.

Примечание. Во избежание перегорания светодиодов последовательно каждому включен балластный резистор с сопротивлением $R = 510$ Ом.

2. Получите вольт-амперную характеристику (ВАХ) **одного** светодиода без балластного резистора в диапазоне напряжений на самом диоде $0 \div 1{,}8$ В. Постройте график ВАХ при значениях напряжения на светодиоде $1{,}2 \div 1{,}8$ В. Нанесите на него погрешности.

Примечание. Приборная погрешность прямых измерений напряжения и силы тока мультиметром равна 0,5 % от значения измеряемой величины.

Оборудование. «Чёрный ящик», потенциометр, батарейка «Крона», колодка для подключения батарейки (положительному выводу соответствует красный провод), миллиметровая бумага, два мультиметра.

Задача 2. Шарик в жидкости

Известно, что сила сопротивления F_c, действующая со стороны жидкости на движущийся в ней со скоростью v шарик диаметром d, может при определённых условиях выражаться формулой

$$F_c = A\eta dv,$$

а при других условиях — формулой

$$F_c = B\rho_{ж} d^2 v^2,$$

где A и B — некоторые безразмерные константы, $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, η — её вязкость.

1. Определите, какая из двух приведённых формул лучше описывает зависимость силы сопротивления от скорости выданных вам свинцовых шариков (плотность свинца 11,3 г/см^3).

2. Определите плотность шариков из неизвестного материала. Считайте плотность жидкости равной плотности воды.

Примечание. Погрешности не учитывать.

Оборудование. Стеклянный сосуд, наполненный жидкостью (высота столба жидкости порядка 40 см), миллиметровая бумага, секундомер, резинки, набор свинцовых шариков (охотничьей дроби) с известными диаметрами, несколько одинаковых шариков из неизвестного материала с известным диаметром.

10 класс

Задача 1. Чёрный ящик-2

В чёрном ящике с тремя выводами («К» — красный, «С» — синий, «Б» — белый) находятся конденсатор, резистор (сопротивление резистора несколько мегаом) и цепочка последовательно соединённых диода и выключателя. Эти три элемента соединены либо «звездой», либо «треугольником».

1. Расшифруйте схему чёрного ящика.
2. Определите сопротивление резистора.
3. Определите ёмкость конденсатора.
4. Снимите вольт-амперную характеристику диода. Постройте её график.

Считайте, что погрешность измерений мультиметром составляет 0,5% от результата.

Оборудование. Чёрный ящик, соединительные провода, потенциометр, резистор с сопротивлением $R = 100$ Ом ($\pm 5\%$), батарейка, цифровой вольтметр с внутренним сопротивлением $R_V = 1$ МОм ($\pm 0{,}5\%$), секундомер.

Задача 2. Воздушный шарик

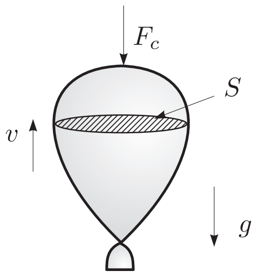


Рис. 2

Известно, что при скоростях движения шарика, превышающих ~10 см/с, сила сопротивления воздуха определяется формулой

$$F_c = \beta S^m v^n \rho^p, \qquad (1)$$

где β — безразмерный коэффициент, S — площадь максимального поперечного сечения шарика (рис. 2), v — скорость его движения, ρ — плотность воздуха, m, n, p — некоторые числа.

1. Определите (теоретически) показатели степени m, n и p в формуле (1).
2. Опишите эксперимент, позволяющий с помощью имеющегося оборудования определить зависимость силы сопротивления воздуха от скорости движения шарика. Проведите этот эксперимент.
3. По результатам измерений определите значение коэффициента β.

Примечание: плотность воздуха $\rho = 1{,}3$ кг/м^3. Считайте, что скорость шарика устанавливается на пути порядка размера шарика.

Оборудование. Большой воздушный шарик с лёгкой ниткой, наполненный гелием, кусочек пластилина, 10 скрепок массой $m = 0{,}41 \pm 0{,}01$ г каждая, секундомер, нить и ученическая линейка, миллиметровая бумага. Эксперимент проводится в помещении с известной высотой.

11 класс

Задача 1. Диод

С каждым годом промышленность осваивает производство все более мощных и эффективных светодиодов (рис. 3). Современные технологии позволяют получать большие излучающие кристаллы в компактной оболочке, потребляющие мощность до 30 Вт и испускающие мощный поток света.

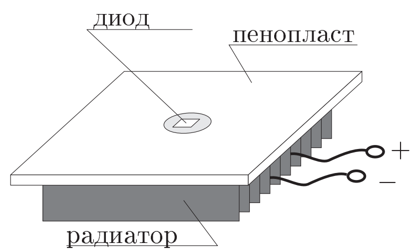


Рис. 3

Задание 1.

1. **(1 балл)** Измерьте минимальное напряжение U_0 на светодиоде, при котором он начинает светиться.
2. **(4 балла)** Снимите зависимость силы тока I от напряжения U на светодиоде. Поскольку при заданном напряжении сила тока зависит от температуры, подождите пока температура при заданном напряжении стабилизируется. Укажите время стабилизации. Постройте вольт-амперную характеристику (ВАХ) светодиода при силе тока, протекающего через него $0 \div 0{,}7$ А.
3. **(8 баллов)** Вычислите КПД η светодиода в режиме, когда сила тока, протекающего через него, $I_{\max} = 0{,}7$ А. Зарисуйте схему, опишите методику измерения.
4. **(6 баллов)** Определите теплоёмкость C дополнительного радиатора. Зная молярную теплоёмкость алюминия $C_{\text{М}} = 3R$ и его молярную массу $\mu = 27$ г/моль вычислите массу m дополнительного радиатора.

Примечание.

1. Согласно закону Ньютона-Рихмана тепловой поток от радиатора (количество теплоты за единицу времени) в окружающую среду прямо пропорционален разности температур радиатора и воздуха в комнате.
2. Категорически запрещается пропускать через светодиод ток силой более 0,75 А и нагревать систему до температуры более 80°С. Несоблюдение этих правил может привести к выходу из строя светодиода, который повторно не выдаётся.
3. Запрещается крутить регулировку силы тока CURRENT на источнике.

Задание 2.

Видимый спектр излучения светодиода представляет собой узкую коротковолновую и широкую длинноволновую полосы (рис. 4).

1. **(4 балла)** Определите среднее значение длины волны λ_0 коротковолновой полосы излучения светодиода.
2. **(4 балла)** Определите её ширину $\Delta\lambda$.

3. **(3 балла)** Зарисуйте схему, опишите методику измерения.

Внимание! При оптических измерениях напряжение на светодиоде не должно превышать 10 В.

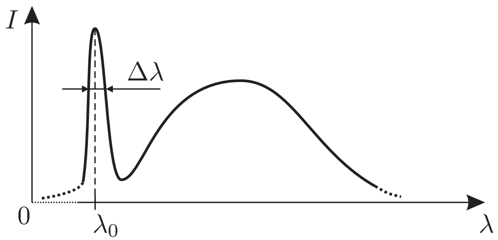


Рис. 4

Оборудование. Светодиод на основном алюминиевом радиаторе, дополнительный радиатор (изготовлен из того же профиля, что и основной), мультиметр с термопарой, источник постоянного тока с регулируемым напряжением и встроенным вольтметром и амперметром, секундомер, кольцевая резинка, пенополистироловый клин, брусок с пазом, мерная лента длиной 1 м, дифракционная решетка (500 штрихов/мм) с подставкой, кусочек чёрной бумаги с прорезью, стикеры (клеящиеся бумажки), лист бумаги.

Возможные решения
9 класс

Задача 1. «Чёрный ящик-1»

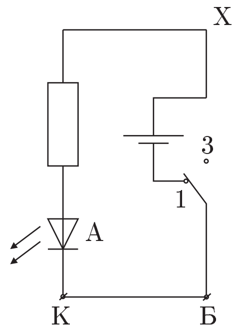


Рис. 5

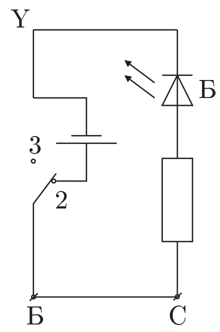


Рис. 6

1. Поскольку в «чёрном ящике» находятся батарейки, начнём анализ цепи без подключения внешного источника.

а) Замыкаем между собой выводу «К» и «Б». В положении (1) переключателя загорается светодиод А. В других положениях переключателя светодиоды не горят. Возможный фрагмент схемы приведен на рис. 5.

б) Замыкаем между собой выводу «Б» и «С». В положении (2) переключателя загорается светодиод Б. В других положениях переключателя светодиоды не горят. Возможный фрагмент схемы приведен на рис. 6.

в) Проверяем, соединены ли точки «X» и «Y». Для этого подключаем положительный вывод батарейки к выводу «С», а отрицательный к «К». Загораются оба светодиода. Следовательно выводы «X» и «Y» замкнуты накоротко.

г) Для проверки, замкнём накоротко выводы «К» и «С». При всех положениях ключа светодиоды не горят. Отсюда получаем схему «чёрного ящика» (рис. 7).

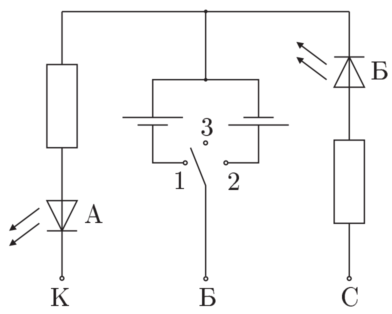


Рис. 7

2. Для снятия вольт-амперной характеристики соберем схему (рис. 8). Сила тока I через диод равна силе тока I_A через амперметр, Напряжение на диоде вычисляем по формуле $U = U_V/2 - I_A R$, где U_V — напряжение на вольтметре. Для увеличения точности проводим измерения три раза и строим график $I(U)$. Пример ВАХ светодиода приведен на рис. 9.

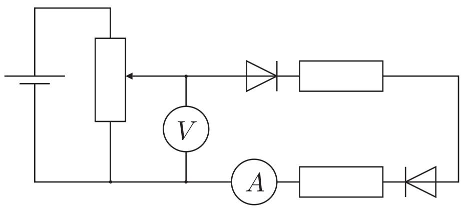


Рис. 8

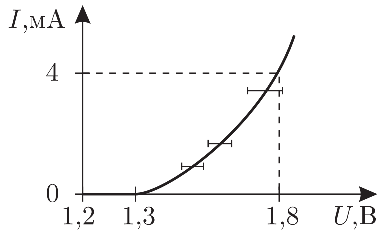


Рис. 9

Задача 2. Шарик в жидкости

1. При установившемся падении шарика в жидкости, сила сопротивления уравновешивается силой тяжести и архимедовой силой:

$$mg = F_c + F_{\text{А}},$$

где $m = \pi d^3/6$ — масса шарика. Если сила сопротивления задаётся формулой $F_{\text{c}} = A\eta dv$, то:

$$\frac{\pi(\rho - \rho_{\text{ж}})gd^3}{6} = A\eta dv,$$

отсюда

$$v = (\rho - \rho_{\text{ж}})K_1 d^2,$$

где $K_1 = \dfrac{\pi g}{6A\eta}$ — некоторая константа, зависящая только от свойств жидкости. Аналогично для случая, если выполняется зависимость $F_{\text{c}} = B\rho_{\text{ж}} d^2 v^2$:

$$\frac{\pi(\rho - \rho_{\text{ж}})gd^3}{6} = B\rho_{\text{ж}} d^2 v^2,$$

$$v^2 = K_2(\rho - \rho_{\text{ж}})d,$$

где $K_2 = \dfrac{\pi g}{6B\rho_{\text{ж}}}$ — некоторая константа, зависящая только от свойств жидкости.

Чтобы выведенные соотношения выполнялись, нужно убедиться, что установилось равномерное движение. Для этого зафиксируем резиночками два одинаковых расстояния и сравним время прохождения шарика.

Измеряем время t движения шарика с постоянной скоростью. При этом шарик проходит расстояние x, которое зафиксируем при помощи резинок. Тогда скорость движения шарика $v = x/t$.

Построим на графике зависомости $t^{-1}(d^2)$ и $t^{-2}(d)$.

Для шариков каждого диаметра проведём не менее трёх измерений.

Прямую линию, проходящую через ноль, получаем только на первом графике, это означает, что верна формула

$$F_{\text{c}} = A\eta dv.$$

2. Проведём несколько измерений для шариков из неизвестного материала и получим среднее значение $t_{\text{ср}}$. Значение $\alpha = \dfrac{(\rho - \rho_{\text{ж}})K_1}{x}$ определим как угловой коэффициент наклона прямой на графике $t^{-1}(d^2)$ для свинцовых шариков. Получим,

$$\frac{1}{t_{\text{ср}}} = \frac{(\rho_0 - \rho_{\text{ж}})K_1 d_0^2}{x},$$

$$\rho_0 = \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\alpha t_{\text{ср}} d_0^2} + \rho_{\text{ж}}.$$

10 класс

Задача 1. Чёрный ящик-2

1. Определим схему черного ящика. Для этого будем подключать источник к каждой паре контактов (чтобы точно зарядить конденсатор) и смотреть напряжение на выходе. Понятно, что при схеме подключения «звезда» на паре контактов, содержащей резистор и диод при любом положении ключа напряжения не будет. При схеме подключения «треугольник» наоборот, между любыми двумя выводами есть напряжение, что и наблюдается в эксперименте. Таким образом мы определяем, что элементы в схеме соединены «треугольником».

Проделывая такой же эксперимент, можно определить положение резистора, а также положение, в котором ключ замкнут (в этом положении напряжение на резисторе будет, при другом – нет). Сопротивление резистора порядка нескольких МОм и сравнимо с сопротивлением вольтметра. Поэтому можно определить положение полностью заряженного конденсатора (при разомкнутом ключе напряжение на нем равно напряжению батарейки).

2. Есть много способор определения сопротивления резистора. Например, полностью зарядим конденсатор и разомкнем ключ. Подключим вольтметр к выводам, содержащим диод. При этом

$$\frac{R}{R_V} = \frac{U}{U_0 - U},$$

где R – сопротивление резистора, U – напряжение на нем в начальный момент, R_V – сопротивление вольтметра, U_0 – напряжение батарейки.

Совершенно аналогично можно разомкнуть ключ и соединить резистор, вольтметр и батарейку последовательно.

3. Емкость конденсатора можно определить по его разрядке. Зарядим его, соединим последовательно с резистором и вольтметром и будем снимать зависимость напряжения на вольтметре от времени. При разрядке напряжение на конденсаторе

$$U = U_0 e^{-t/(R+R_V)C}.$$

По снятой зависимости можно получить величину $-t/(R + R_V)C$, а следовательно и C.

4. Для снятия ВАХ диода будем использовать потенциометр для регулировки напряжения. Ключ должен быть замкнут. При подключении источника к диоду ток по остальной части черного ящика течь не будет (из-за большого сопротивления резистора). Вольтметр должен быть подключен последовательно с ящиком. По напряжению на нем мы узнаем ток, по разности напряжения батарейки и этого напряжения – напряжение на диоде.

Задача 2. Воздушный шарик

1. Применим метод размерностей к уравнению (1):

$$[F_\text{c}] = \frac{\text{кг}^p \text{м}^{2m+n-3p}}{\text{с}^n} = \text{Н} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Откуда, решив систему уравнений, получим: $m = 1$, $n = 2$ и $p = 1$.

2. К шарику можно прикрепить скрепки и кусочек пластилина. При подъёме, на него действует сила сопротивления F_c, постоянная выталкивающая сила F_A и сила тяжести Mg, где M — масса шарика и нагрузки. При установившемся равномерном движении шарика, второй закон Ньютона для него запишется в виде:

$$F_\text{A} = F_\text{c} + Mg.$$

Нагружая шарик, добьёмся его равновесия, при этом $F_\text{c} = 0$. Если теперь убрать n скрепок, то при установившемся движении $F_\text{c} = nmg$. Убирая разное количество скрепок и замеряя время поднятия шарика (на участке с установившимся движением), получим зависимость силы сопротивления от скорости.

3. Используя экспериментальные данные, полученные в предыдущем пункте, построим график $F_\text{c}(v^2)$. Он должен получиться линейным. Коэффициент наклона прямой $k = \beta S\rho$. Максимальную площадь поперечного сечения шарика найдём, измерив нитью периметр этого сечения l. Предполагая, что сечение — окружность, получим $S = l^2/(4\pi)$. Зная S и коэффициент k, вычислим β.

11 класс

Задача 1. Диод

Задание 1.

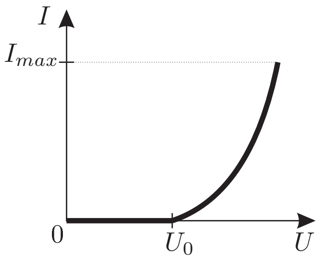


Рис. 10

1. Подключим светодиод к источнику постоянного тока. По вольтметру на источнике тока минимальное напряжение U_0. Качественный вид вольтамперной характеристики показан на рисунке 10.
2. Полезная мощность светодиода P_1 — излучениие, остальная мощность P_2 идёт на нагрев основного радиатора (тепловые потери), поэтому КПД равен:

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_2}.$$

Прикрепим дополнительный радиатор к основному радиатору (рис. 11) при помощи кольцевой резинки (на рисунке не показана). Тогда мощность P_1 идёт на нагрев дополнительного радиатора. Установим светодиод на подставку так, чтобы рёбра радиаторов были вериткальны. Прижмём чувствительную часть термопары пенополистироловым клинышком к дополнительному радиатору. Включим светодиод, снимем зависимость температуры t_1 радиатора вблизи его середины от времени τ излучения светодиода, и построим график $t_1(\tau)$. Считая, что в начальный момент теплообмен радиатора с воздухом отстутствует, получим:

$$P_1 \Delta\tau = C_1 \Delta t_1,$$

$$P_1 = C_1 K_1,$$

где C_1 — теплоёмкость дополнительного радиатора, K_1 — коэффициент наклона касательной на графике $t_1(\tau)$ в начальный момент времени.

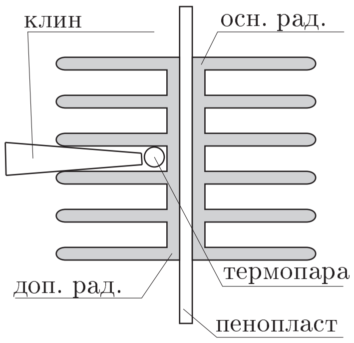


Рис. 11

Аналогично, для основного радиатора:

$$P_2 = C_2 K_2.$$

Радиаторы изготовлены из одинакового профиля, поэтому теплоёмкость одного радиатора пропорциональна длине L. Тогда КПД равен:

$$\eta = \frac{L_1 K_1}{L_1 K_1 + L_2 K_2}.$$

3. Для нахождения теплоёмкости C_1 дополнительного радиатора воспользуемся соотношением:

$$P_1 = C_1 K_1 = \eta P = \eta I_{max} U_{max},$$

где U_{max} — напряжения на диоде при силе тока I_{max},

$$C_1 = \frac{\eta I_{max} U_{max}}{K_1}.$$

Вычислим массу m дополнительного радиатора:

$$m = \frac{C_1}{c_{\text{уд}}} = \frac{C_1 \mu}{3R}.$$

Задание 2. Соберем установку с дифракционной решёткой. Наблюдение ведётся в проходящем свете, как показано на рис. 12. Для первого максимума дифракционной решётки выполняется условие:

$$d \sin\varphi = \lambda,$$

где $\sin(\varphi) = x/\sqrt{x^2 + L^2}$. Чтобы повысить точность измерений следует максимально увеличить базу L.

При взгляде сквозь решетку заметим, что коротковолновой полосе излучения светодиода соответствует синий цвет. Глазом проще заметить положение минимумов интенсивности x_1 и x_2, чем положение максимума x_0. Поэтому, максимуму интенсивности λ_0 соответствует координата $x_0 = (x_1 + x_2)/2$, отсюда

$$\lambda_0 = d\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + L^2}} \approx 460 \text{ нм},$$

$$\Delta\lambda = d\left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + L^2}} - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + L^2}}\right) \approx 10 \text{ нм}.$$

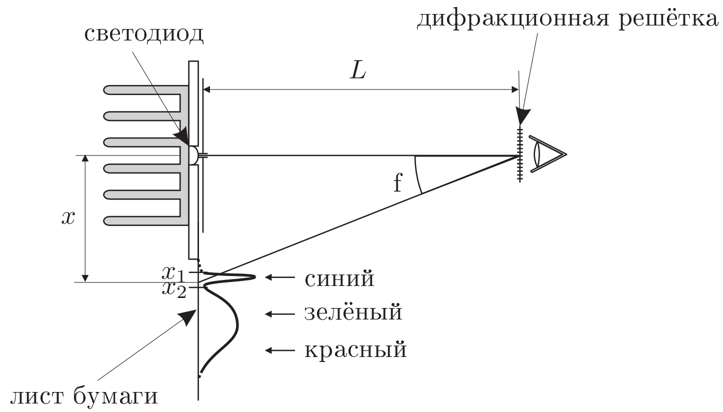


Рис. 12