

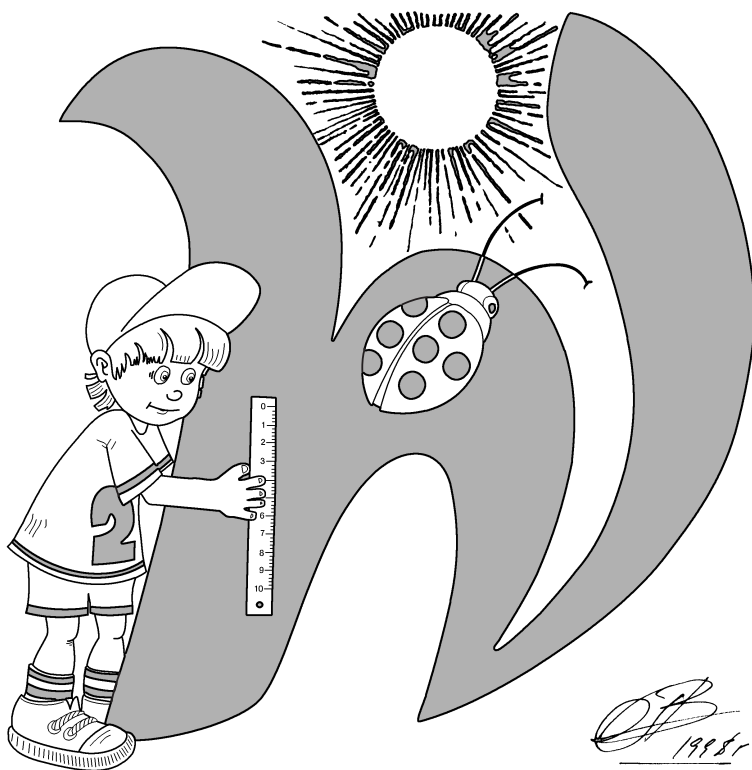
Методическая комиссия по физике  
при центральном оргкомитете  
Всероссийских олимпиад школьников

# XLVIII Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



Санкт-Петербург, 2014 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](mailto:physolymp@gmail.com)

## Авторы задач

### 9 класс

1. Замятнин М.
2. Замятнин М.

### 10 класс

1. Фольклор
2. Гуденко А.

### 11 класс

1. Гуденко А.
2. Варламов С.,  
Тарчевский А.

Общая редакция — Кбзел С., Слободянин В.

Оформление и вёрстка — Паринов Д., Цыбров Ф.

При подготовке оригинал-макета использовалась издательская система  $\text{\LaTeX}$  2 $\epsilon$ .

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

9 класс

Задача 1. Стратификация

**Предостережение**

«Черный ящик» необходимо располагать открытым концом пробирки вверх. Запрещается разбирать установку. При нарушении данного требования возможно необратимое повреждение оборудования, при котором новое оборудование выдаваться не будет. «Чёрный ящик» не взбалтывать, жидкости на вкус не пробовать.

**Запишите в работе номер вашей установки.**

В вертикально расположенной пробирке находятся несколько не смешивающихся между собой жидкостей. Диаметр пробирки  $D$  постоянен по высоте и указан на установке. Напоминаем, что площадь круга вычисляется по формуле  $\pi D^2/4$ .

Определите:

1. плотность материала стержня;
2. плотности жидкостей;
3. объёмы слоёв жидкостей.

**Оборудование.** «Черный ящик» с пробиркой, весы, стержень, нить, два канцелярских зажима, линейка, салфетки, миллиметровая бумага.

**Задача 2. Мостик**

Внутри «серого ящика» находится схема с идеальным источником напряжения, показанная на рис. 1. К выводам, отмеченным  $V$ , подключите мультиметр в режиме вольтметра.

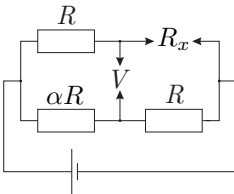


Рис. 1

1. Определите напряжение на источнике  $U_0$  и коэффициент  $\alpha$ .

2. Снимите зависимость показаний вольтметра  $U(R_x)$  от сопротивления  $R_x$  плеча моста (не менее 11 точек в максимально широком диапазоне). Постройте график в координатах, в которых зависимость будет линейной.

3. С помощью полученного графика определите сопротивление  $R_{x0}$ , при котором мост оказывается сбалансированным, и сопротивление  $R$  внутри «серого ящика».

**Оборудование.** «Серый ящик», мультиметр в режиме вольтметра, резисторы известного сопротивления 510 Ом, 1 кОм и 3 кОм, зажимы «крокодил».

## 10 класс

### Задача 1. Конденсаторы

Электролитические конденсаторы (ЭК) — конденсаторы, в которых в качестве диэлектрика используется тонкая оксидная плёнка, нанесённая на поверхность одного из электродов. Их важной особенностью является полярность, то есть включать в цепь их нужно с учётом направления протекающего тока. Плюсу ЭК соответствует длинная ножка, а минусу — короткая, напротив которой есть метка со знаком «-». Все измерения следует проводить, соблюдая правильную полярность.

Сопротивление мультиметра в режиме измерения постоянного напряжения  $R_V = 1,00 \text{ МОм}$  на всех пределах измерения.

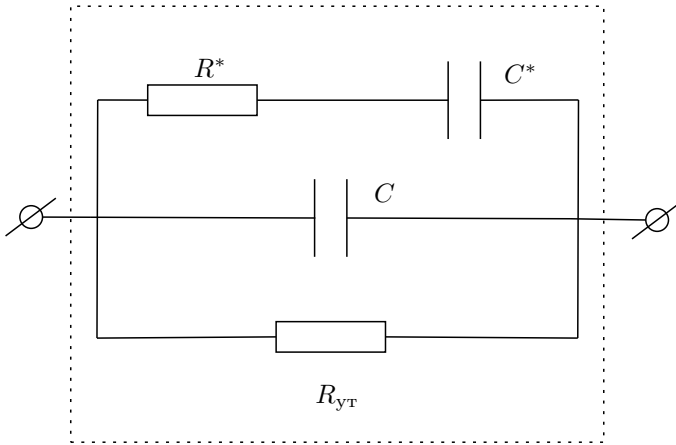


Рис. 2

1. Используя только мультиметр с проводами, определите отношение ёмкостей конденсаторов.
2. Определите значения ёмкостей обоих конденсаторов.
3. Если выводы заряженного конденсатора на небольшое время  $t \approx 5 \text{ с}$  замкнуть, а затем измерить напряжение на нём, то напряжение частично восстановится. Считая, что схема, представленная на рисунке 2, качественно описывает это явление, определите параметр  $C^*$  этой схемы.

Оцените погрешности полученных величин.

**Оборудование.** Два конденсатора неизвестной ёмкости; мультиметр; секундомер; соединительные провода.

### Задача 2. Диффузия гелия

Воздушный шарик, накачанный гелием, относительно быстро сдувается (за несколько часов его объём уменьшается в два раза). Это связано с диф-

фузией гелия через резиновую оболочку шарика. Плотность потока  $j$  гелия (число молекул, проникающих через единичную площадку резины в единицу времени) определяется *законом Фика*:

$$j = D \frac{\Delta n}{\delta},$$

где  $D$  — коэффициент диффузии гелия через резину,  $\delta$  — толщина оболочки надутго шарика,  $\Delta n = n - n_0$  — разность концентрации  $n$  гелия внутри шарика и  $n_0$  вне.

**Задание.** Определите коэффициент диффузии  $D$  гелия через резину. Считайте, что шарик проницаем только для гелия, то есть воздух не проникает внутрь шарика. Убедитесь в этом экспериментально.

Молярная масса воздуха и гелия  $\mu_{\text{воз}} = 29$  г/моль,  $\mu_{\text{He}} = 4$  г/моль. Давление в шарике считайте равным атмосферному давлению в аудитории  $p_0 = 10^5$  Па. Температура в аудитории  $t = 27^\circ\text{C}$ , плотность резины  $\rho_{\text{рез}} = 1,05$  г/см<sup>3</sup>, ускорение свободного падения  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>. Считайте, что при надувании шарика плотность резины не меняется и утечкой гелия через узел можно пренебречь

**Оборудование.** Два одинаковых резиновых шарика, один из которых накачан гелием; весы; три груза (гайки); бумажная измерительная лента; миллиметровая бумага; секундомер; ножницы (по требованию).

## 11 класс

### Задача 1. Эксцентричная струна

Стоячие поперечные волны в натянутой резиновой нити можно возбудить с помощью периодического воздействия на нить вблизи точки закрепления. При определённых частотах воздействия возникает резонансное возрастание амплитуды колебаний. В возникшей стоячей волне на длине нити укладывается целое число полуволен.

Скорость  $u$  распространения поперечной волны небольшой амплитуды, бегущей по резиновой нити, зависит от её погонной плотности  $\rho_l$  [кг/м] и силы её натяжения  $T$  по формуле:

$$u = \sqrt{\frac{T}{\rho_l}}.$$

Зная скорость волны, несложно рассчитать резонансные частоты в зависимости от силы натяжения нити, её длины и погонной плотности.

1. Соберите установку для возбуждения волн в натянутой нити. Опишите методику измерения резонансных частот стоячих волн в натянутой резиновой нити.
2. Определите наименьшие резонансные частоты поперечных колебаний резиновой нити для нескольких (5–7) значений силы её натяжения  $T$ , увеличивая длину нити  $l$  вплоть до значения  $l = 2l_0$ , где  $l_0$  — длина нерастянутой нити.
3. Получите теоретическую зависимость наименьшей резонансной частоты колебаний нити от силы её натяжения и длины  $f = f(T, l)$ .
4. Используя результаты измерений пункта 2, сравните теоретическую зависимость  $f(T, l)$  с экспериментом.
5. Определите погонную плотность  $\rho_l$  нити.
6. Для силы натяжения  $T = 0,16$  Н определите все резонансные частоты  $f_n$ , которые можно получить с помощью предоставленного оборудования\*. Постройте экспериментальную зависимость  $f_n(\lambda)$ , где  $\lambda$  — длина волны, и объясните её теоретически. Определите по этим данным скорость волны.

**ВНИМАНИЕ.** \*Максимальное напряжение, которое можно прикладывать к электромотору,  $U_{\text{макс}} = 9$  В. Взамен сгоревших электромоторов новые выдаваться *не будут*. Изменять расположение электромотора запрещается.

**Оборудование.** Тонкая резиновая нить длиной около 30 см, закреплённая на клипсах, электромотор с эксцентриком, прикрепленный к столу, регулируемый источник постоянного тока, стробоскоп, динамометр, бумажная измерительная лента, полоса чёрной бумаги.

### Задача 2. Ток в пробирке

Большинство стёкол состоят из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  и оксидов щелочных металлов ( $\text{Na}_2\text{O}$  или  $\text{K}_2\text{O}$ ). Присутствие катионов щелочных металлов обеспечивает сла-

бую проводимость стекла. Но в отличие от электронов в металле, катионы в стекле не могут двигаться свободно: чтобы «перескочить» в новое место, катион должен обладать энергией большей, чем некоторый потенциальный барьер — энергия активации  $W_a$ . Количество подвижных катионов, то есть катионов с энергией большей  $W_a$ , при температуре порядка комнатной согласно закону Больцмана:

$$N \propto \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right),$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана. Проводимость стекла  $\sigma$  пропорциональна количеству подвижных катионов, соответственно, удельное сопротивление  $\rho$  — обратно пропорционально:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — некоторый постоянный коэффициент.

1. Снимите зависимость удельного сопротивления стекла пробирки  $\rho(t)$  от температуры в диапазоне от  $t_1 = 45^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 75^\circ\text{C}$  (не менее 15 точек).
2. Определите энергию активации  $W_a$  катионов в стекле пробирки и выразите её в электронвольтах. Элементарный заряд  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

*Примечание.* Внутреннее сопротивление  $R_M$  мультиметра на различных диапазонах приведено в таблице. Погрешность  $R_M$  составляет 1%.

Диапазон	$R_M$ , Ом
10 А	1
200 мА	10
20 мА	20
2000 мкА	100
200 мкА	$10^3$
Все диапазоны вольтметра V	$10^6$

**Оборудование.** Стеклоянная пробирка (толщина стенок  $\delta = 1,10 \pm 0,05$  мм), пластмассовый стакан, пенопластовая крышка, термометр, мультиметр, миллиметровая бумага, линейка, батарейка «Крона», клеммы, провод, горячая вода по требованию, салфетка.

## Возможные решения

### 9 класс

#### Задача 1. Стратификация

1. Диаметр стержня измерим путём прокатывания стержня по линейке. Необходимо установить диаметр стержня с высокой точностью, так как иначе погрешность в определении плотности окажется велика.

Плотность материала стержня  $\rho_c$  найдем измерив масса стержня  $m_0$  и его объём  $V$ . Для этого проведём непосредственное измерение длины стержня с помощью линейки.

2. Поставим «черный ящик» на весы, стрежень привяжем к нити. Линейку закрепим горизонтально на столе зажимами в углу стола. Нить перекинем через угол стола. В этом случае смещение нити по горизонтали равно глубине погружения  $h$ .

Снимем зависимость показаний весов  $m$  от глубины погружения стержня  $h$ .

Пусть верхний конец стержня находится в жидкости плотностью  $\rho_B$ , нижний конец — в жидкости плотностью  $\rho_H$ . При погружении стержня в жидкость на глубину  $\Delta h$  граница раздела жидкостей поднимается на высоту  $\Delta H$  (рис. 3), а показания весов увеличиваются на массу вытесненной жидкости  $\Delta m$ .

Объём жидкости не меняется, поэтому величины  $\Delta h$  и  $\Delta H$  связаны соотношением:

$$s\Delta h = (S_0 - s)\Delta H,$$

где  $s$  — площадь сечения стержня,  $S_0$  — площадь сечения пробирки.

Увеличение объёма  $\Delta V = s(\Delta H + \Delta h)$  вытесненной жидкости плотностью  $\rho_H$  приводит к увеличению показаний весов на величину  $\Delta m_1 = \rho_H \Delta V$ . Тот же объём  $\Delta V$  занимает жидкость плотностью  $\rho_B$ , поэтому показания весов уменьшаются на  $\Delta m_2 = \rho_B \Delta V$ .

Суммарное изменение показаний весов равно:

$$\Delta m = \Delta m_1 - \Delta m_2 = (\rho_H - \rho_B)(\Delta H + \Delta h)s = \frac{(\rho_H - \rho_B)s\Delta h}{1 - s/S_0}.$$

По коэффициенту наклона  $k = \Delta m/\Delta h$  графика  $m(h)$  (рис. 4) находим разность плотностей жидкостей, в которых при данной глубине  $h$  находятся нижний и верхний конец стрежня:

$$\rho_H - \rho_B = (1 - s/S_0) \cdot k/s.$$

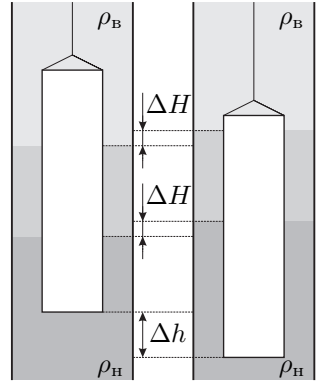


Рис. 3



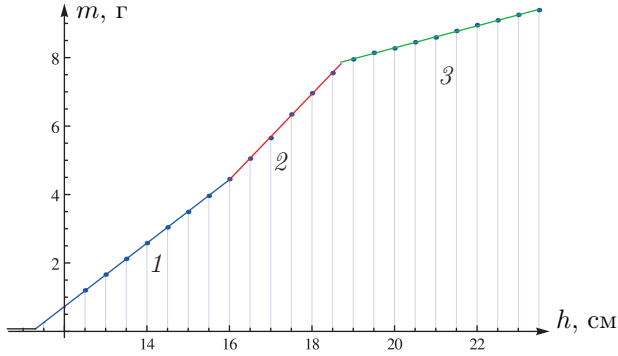


Рис. 4

Три наклонных участка на графике соответствуют двум жидкостям в пробирке: на участке 1 верхний конец стержня находится в воздухе, нижний — в первой жидкости плотностью  $\rho_1$ ; на участке 2 верхний конец в воздухе, нижний — в жидкости плотностью  $\rho_2$ ; на участке 3 верхний конец в жидкости плотностью  $\rho_1$ , нижний —  $\rho_2$ .

3. Объем жидкости равен произведению площади пробирки  $\pi D^2/4$  на высоту жидкости. Высота первой жидкости равна изменению глубины погружения стержня на участке 1, высота второй жидкости — на участках 2 и 3.

### Задача 2. Мостик

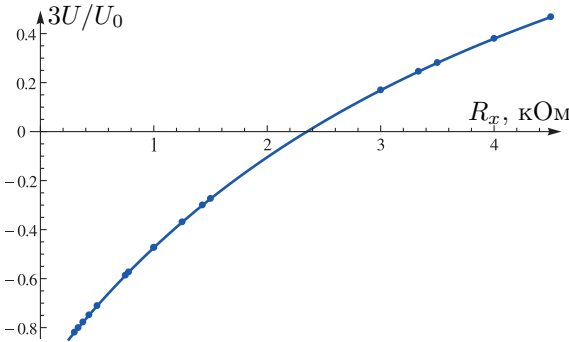


Рис. 5

1. Если выводы «серого ящика» оставить разомкнутыми, то по нижней ветви течёт ток, а вольтметр показывает падение напряжения  $U_1$  на резисторе  $\alpha R$ .

$$U_1 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} U_0.$$

Если теперь выводы замкнуть накоротко, то вольтметр покажет напряжение:

$$U_2 = \frac{1}{\alpha + 1} U_0.$$

Находим коэффициент  $\alpha = U_1/U_2$ , а затем напряжение  $U_0 = U_2(\alpha + 1)$ .

2. Для исследования зависимости подключаем резисторы, по разному соединённые между собой. С помощью трех различных резисторов возможно получить 17 различных сопротивлений  $R_x$ . Оказывается, что между 1,5 кОм

и 3 кОм нет промежуточных значений (рис. 5). В этой области необходимо провести интерполяцию. Для этого проанализируем зависимость теоретически и перейдём к другим переменным. Напряжение, которое показывает вольтметр при подключении произвольного резистора сопротивления  $R_x$ :

$$U = \frac{U_0}{\alpha + 1} - U_0 \frac{R_x}{R + R_x}, \quad (2)$$

причём заметим, что первое слагаемое соответствует измеренному ранее напряжению  $U_2$ .

Перепишем выражение (2) в виде:

$$\frac{U_0}{U_2 - U} = \frac{R}{R_x} + 1.$$

Построим график зависимости  $U_0/(U_2 - U)$  от  $1/R_x$ , и по угловому коэффициенту наклона графика (рис. 6) определим искомое значение  $R$ . При  $U = 0$  мост сбалансирован, откуда путём интерполяции находим искомое значение  $R_{x0}$ .

Также можно определить  $R$  исходя из того, что сопротивление  $R = \alpha R_{x0}$ .

3. Найти сопротивление  $R$  можно теоретически при любом  $R_x$ , рассчитав напряжение  $U$  для несбалансированного моста. Для повышения точности рассчитанные  $R$  необходимо усреднить.

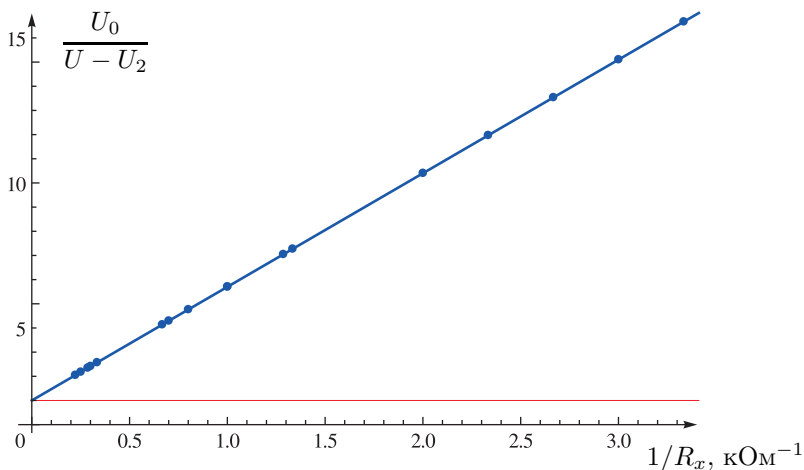


Рис. 6

10 класс

Задача 1. Конденсаторы

Задача 2. Диффузия гелия

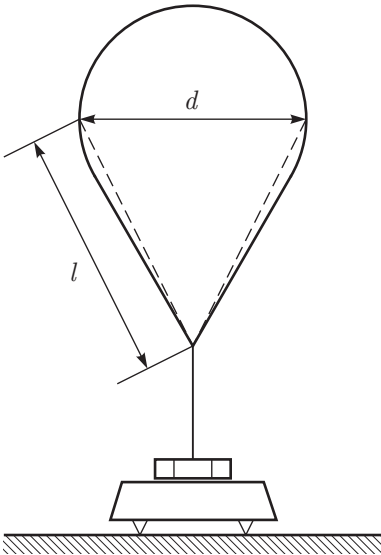


Рис. 7

1. Пусть  $S$  — площадь поверхности шарика,  $V$  — его объём,  $\rho_0$  — плотность воздуха,  $\rho_{\text{He}}$  — плотность гелия. За время  $t$  через поверхность шарика в атмосферу выйдет

$$\Delta N = jSt = \frac{DSnt}{\delta} = \frac{DSNt}{V\delta}$$

молекул гелия (внутри шарика концентрация  $n = N/V$ , вне шарика концентрацию гелия считаем равной нулю:  $n_0 = 0$ ). За небольшое время относительное уменьшение объёма  $\Delta V/V = \Delta N/N = DS t/V\delta$ . Соответственно, относительное уменьшение подъёмной силы  $F_{\text{п}} = (\rho_0 - \rho_{\text{He}})Vg$  равно:  $\Delta F_{\text{п}}/F_{\text{п}} = \Delta V/V = S D t/V\delta$ . Тогда  $\Delta F_{\text{п}} = DS F_{\text{п}} t/V\delta = DS(\rho_0 - \rho_{\text{He}})gt/\delta$ . Последняя формула даёт закон изменения (уменьшения) подъёмной силы с течением времени:  $\Delta F_{\text{п}} = \Delta F_{\text{п}}(t)$ .

2. Прикрепим к шару, заполненному гелием, груз и взвесим его на весах (рис. 7). Сила тяжести груза превышает подъёмную силу шарика. Груз давит на весы с силой равной разности силы тяжести, действующей на груз, оболочку и нить, и подъёмной силы шарика  $F = m_{\text{г}}g - F_{\text{п}}$ . Поскольку с течением времени подъёмная сила уменьшается, то показания весов увеличиваются по закону

$$m(t) = \frac{F}{g} = m_0 + \beta t, \quad \text{где} \quad \beta = DS(\rho_0 - \rho_{\text{He}})/\delta.$$

Коэффициент  $\beta$  можно определить экспериментально по наклону графика  $m(t)$ . Зная  $\beta$ , коэффициент  $D$  рассчитываем по формуле

$$D = \beta\delta/S(\rho_0 - \rho_{\text{He}}).$$

Толщина  $\delta$  измеряется делением массы растягивающейся поверхности на её площадь и на плотность резины:

$$\delta = m_{\text{об}}/S\rho_{\text{рез}}.$$

3. По данным из таблицы 1 строим график зависимости показаний весов от времени (рис. 8) и по угловому коэффициенту наилучшей прямой определяем величину  $\beta$ :

$$\beta = 11,2 \cdot 10^{-5} \text{ г/с}.$$

$m$ , г	6,27	6,31	6,34	6,34	6,38	6,39	6,40	6,39	6,44
$t$ , мин	0	2	4	6	8	10	12	15	20
$m$ , г	6,49	6,52	6,56	6,59	6,61	6,64	6,67	6,69	
$t$ , мин	25	30	35	40	45	50	55	60	

Таблица 1: экспериментальные данные.

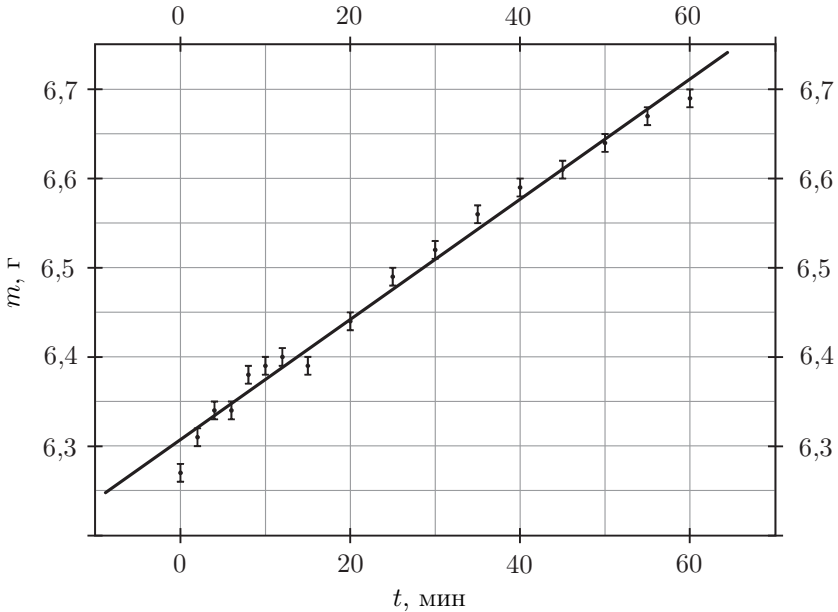


Рис. 8

4. Площадь поверхности шара оценим, приближая её полусферой и конусом:  $S = (\pi d^2 + \pi ld)/2$ , где  $d$  — диаметр обхвата шарика,  $l$  — длина ребра. Результаты измерений:

$$\pi d = 70,0 \text{ см}, \quad l = 22,0 \text{ см},$$

откуда  $S = 0,155 \text{ м}^2$ . Для оценки толщины резины  $\delta$  измеряем массу растягиваемой части шарика  $m = 2,30 \text{ г}$  и делим на площадь и плотность (объём резины при растяжении считаем неизменным), получаем  $\delta = 0,0141 \text{ мм}$ . Нужно также учесть, что хвостик шарика не растягивается в ходе эксперимента, поэтому его надо отрезать при измерении массы второго шарика. Плотность воздуха  $\rho_0 = \mu_v p_0 / RT = 1,16 \text{ кг/м}^3$ . Плотность гелия  $\rho_{\text{He}} = 0,16 \text{ кг/м}^3$ . Искомый коэффициент диффузии

$$D = 1,02 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}.$$

5. Чтобы убедиться в том, что в шарик не попадает воздух, достаточно оценить объём шарика в конце эксперимента. Если воздух не проникал в шарик в ходе эксперимента, то подъёмная сила, вычисленная по формуле для силы Архимеда (в предположении, что в шарике гелий) и измеренная экспериментально, должны быть равны. Объём шарика рассчитаем, разбив его на полусферу и конус:  $V = \pi d^2(d + \sqrt{l^2 - (d/2)^2})/12$ .

Учитывая предыдущие значения, а также вычисляя по теореме Пифагора высоту конуса, находим:  $V = 53,6 \cdot 10^2 \text{ см}^3$ .

Величину подъёмной силы измерить просто — достаточно придержать шарик, чтобы измерить массу груза. Она равна 10,00 г. Масса пустого шарика — 3,00 г. Тогда подъёмная сила в конце эксперимента (через 1,5 часа) равна 6,31 г. Если учесть, что разница плотностей примерно равна 1 г/л, то в пределах погрешности шарик по-прежнему заполнен только гелием.

11 класс

Задача 1. Эксцентричная струна

Задача 2. Ток в пробирке

1. Удельное сопротивление стекла  $\rho$  можно определить, измеряя сопротивление системы вода–пробирка–вода (рис. 9). Убедимся, опустив в воду клеммы мультиметра в режиме омметра что удельное сопротивление воды достаточно мало. Растворённые в воде соли делают её идеальным проводником по сравнению со стеклом, поэтому сопротивление такой системы будет равно сопротивлению пробирки  $R$ :

$$R = \rho \frac{\delta}{S}, \quad (3)$$

где  $\delta$  — толщина стекла пробирки, а  $S$  — площадь поверхности пробирки.

Как известно, стекло плохо проводит ток, поэтому разумно ожидать, что сопротивление  $R$  окажется большим. Действительно, прямые измерения мультиметром в режиме омметра даже на самом большом диапазоне не позволяют определить сопротивление пробирки (мультиметр зашкаливает). Можно заключить, что  $R > 1$  МОм.

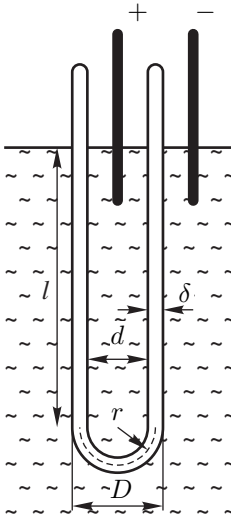


Рис. 9

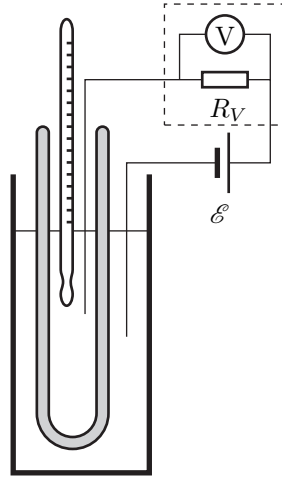


Рис. 10

Если мы подключим к электродам батарейку с  $\mathcal{E} = 9$  В, то сила тока, протекающего через стекло:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} < 10 \text{ мкА},$$

что нельзя измерить мультиметром в режиме миллиамперметра.

Чтобы измерить очень малый ток воспользуемся тем фактом, что в режиме милливольтметра у мультиметра внутреннее сопротивление  $R_V = 1,0$  МОм. Тогда подключив его последовательно с пробиркой (рис. 10), можно по его показаниям  $U$  найти значение тока и, следовательно, сопротивление пробирки:

$$I = \frac{U}{R_V}, \quad \text{откуда} \quad R = \frac{\mathcal{E} - U}{I} = \frac{\mathcal{E} - U}{U} R_V = \frac{\mathcal{E}}{U} R_V, \quad (4)$$

так как  $U \ll \mathcal{E}$ .

Соберём установку, поместим термометр внутрь пробирки, нальём горячую воду и будем снимать зависимость показаний мультиметра в режиме милливольтметра  $U$  от температуры  $t$  по мере остывания. Значение  $R$  найдём по формуле (4), предварительно определив точное значение  $\mathcal{E}$  мультиметром. Стоит обратить внимание на то, чтобы часть пробирки, не погружённая в воду, оставалась сухой. Водная плёнка на поверхности пробирки может заколотить схему, и измеряемое сопротивление будет значительно меньше.

Чтобы получить значения удельного сопротивления, зная  $R$ , необходимо измерить геометрические параметры пробирки. Толщина  $\delta$  дана в условии, а внешний диаметр можно получить прокатив пробирку по миллиметровке. Если пробирка совершила  $n$  оборотов и прошла расстояние  $L_D$ , то внешний диаметр:

$$D = \frac{L_D}{\pi n}.$$

Площадь  $S$  можно оценить, представив пробирку как тонкостенный цилиндр длины  $l$  со средним радиусом  $r = (D - \delta)/2$  с полусферическим дном того же радиуса. В этом случае площадь поверхности:

$$S = 2\pi r l + 2\pi r^2. \quad (5)$$

Окончательно, найдём значения  $\rho$  с использованием формул (3), (4) и (5) для разных значений температуры:

$$\rho = \frac{\mathcal{E}}{U} R_V \frac{2\pi r(l+r)}{\delta}.$$

2. Чтобы определить значение энергии активации, прологарифмируем (1):

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{W_a}{kT}.$$

Таким образом, график зависимости  $\ln \rho(T^{-1})$  должен быть линейен (рис. 11), причём значение линейного коэффициента  $\alpha = W_a/k$ . Зная значение коэффициента  $\alpha$ , найдём энергию активации  $W_a$  в электронвольтах:

$$W_a = \alpha \frac{k}{e}.$$

Для стекла пробирок, участвовавших в эксперименте, значение энергии активации составляло  $W_a = 0,85 \pm 0,03$  эВ.

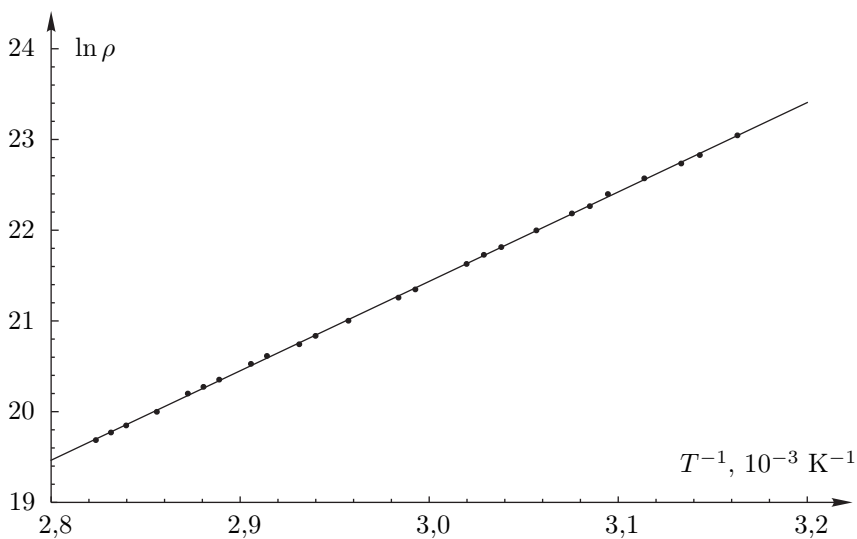


Рис. 11