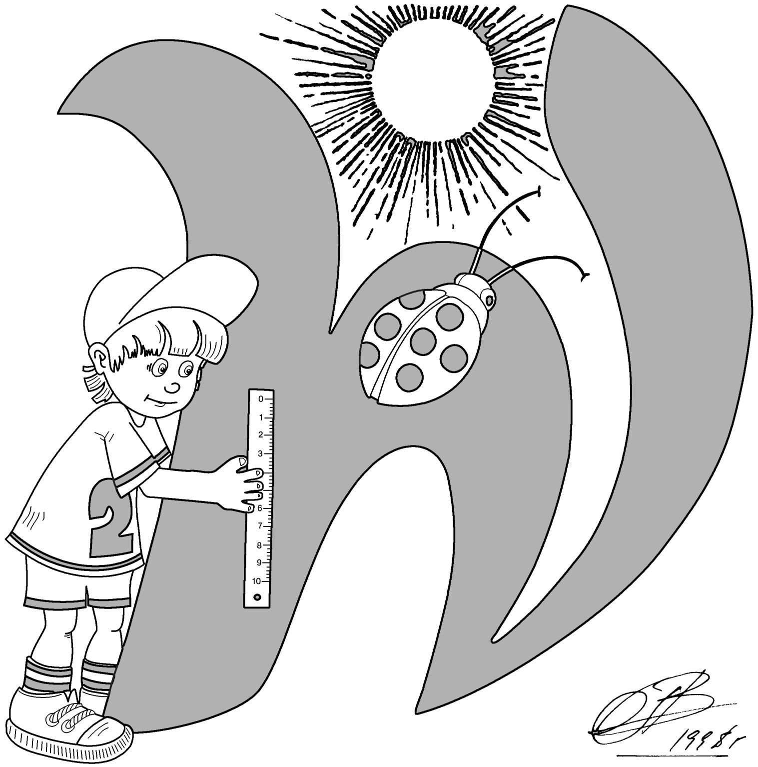
Методическая комиссия по физике
при центральном оргкомитете
Всероссийских олимпиад школьников

XLVII Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



Владивосток, 2013 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. Майер В.	1. Фольклор	1. Гуденко А.
2. Замятнин М.	2. Костарев В.	2. Костарев В.

Общая редакция — Ко́зел С., Слободянин В.

Оформление и вёрстка — Ерофеев И., Паринов Д., Цыбров Ф.

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

Подписано в печать 18 апреля 2013 г. в 14:12.

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

9 класс

Задача 1. Падение шарика

Рассмотрим теннисный шарик, падающий на поверхность доски (рис. 1). Пусть v_{1x} и v_{1z} — модули проекций его скорости до удара, v_{2x} и v_{2z} — после удара (ось Oz перпендикулярна плоскости доски). Введём коэффициенты:

$$k = \frac{v_{2z}}{v_{1z}}, \qquad n = \frac{v_{2x}}{v_{1x}}.$$

Задание.
1. Измерьте коэффициент k двумя способами (в одном из них используя секундомер) для угла $\alpha = 0$.
2. Для различных высот h в диапазоне от 4 см до 20 см с шагом 2 см измерьте расстояние L, которое шарик пролетает вдоль наклонной плоскости между первым и вторым отскоками. Бросать шарик следует с фиксированной высоты $H = 30$ см. Постройте график зависимости L от h.
3. Из предыдущих измерений определите коэффициент n.

Указание. Считайте, что коэффициенты k и n не зависят от угла падения.

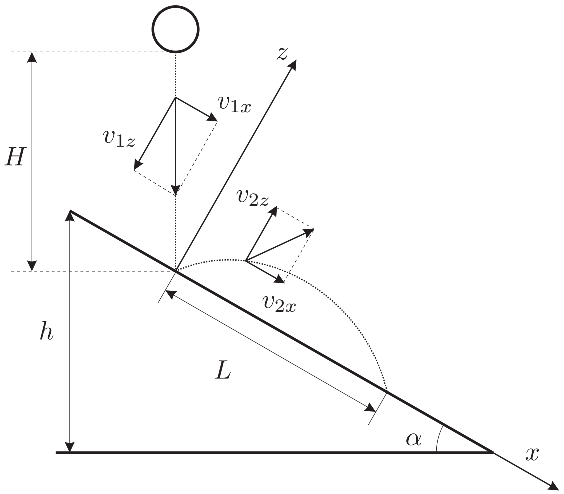


Рис. 1

Оборудование. Штатив с лапкой, клипса, доска, шарик для настольного тенниса, линейка, измерительная лента, секундомер.

Примечание. При измерениях используйте гладкую сторону доски.

Задача 2. Оптическая плотность

Проверьте справедливость предположения, что отношение плотностей двух жидкостей равно отношению их показателей преломления, то есть:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

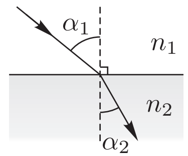


Рис. 2

Указание. При прохождении света из среды (1) в среду (2) через плоскую границу раздела этих сред (рис. 2) справедлив закон Снелла:

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2,$$

где α_1 — угол падения, α_2 — угол преломления.

ВНИМАНИЕ. **Будьте осторожны с лазером! Избегайте попадания лазерных лучей в глаза!**

Примечание. Влиянием стенок кюветы можно пренебречь.

Исключите смешивание жидкостей из различных кювет, так как это может привести к фатальному искажению результатов эксперимента!

Ресурс работы лазера ограничен 1,0 ÷ 1,5 минутами!!!

Оборудование. Две тонкостенные кюветы с прозрачными жидкостями, два пластиковых стаканчика, шарик тонущий в воде, нить, электронные весы, салфетки, лазерная указка и подставка для неё, лист бумаги А3 для построений (сдаётся по окончании работы), линейка.

10 класс

Задача 1. Стадион

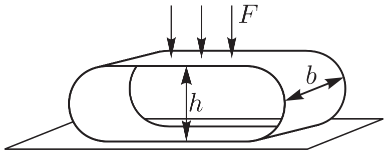


Рис. 3

Пусть из полоски бумаги свёрнуто кольцо. Известно, что если положить на кольцо лёгкую площадку, на которую подействовать силой F (рис. 3), то кольцо принимает форму «стадиона». В некотором диапазоне деформаций выполняется формула:

$$F = kE^{\alpha}h^{\beta}b^{\gamma}d^{\delta}, \tag{1}$$

где b — ширина полоски, d — толщина бумаги, k — безразмерная константа, E — модуль Юнга бумаги, h — размер указанный на рисунке.

Под модулем Юнга E подразумевается коэффициент в законе Гука $E\dfrac{\Delta l}{l} = \dfrac{f}{S}$, где $\dfrac{\Delta l}{l}$ — относительная деформация, f — сила, вызывающая деформацию, S — площадь поперечного сечения.

1. Сверните кольцо из полоски бумаги (шириной $b = 9{,}5$ см).
2. Снимите зависимость h от F.
3. Определите диапазон h, в котором выполняется формула (1).
4. В этом диапазоне найдите коэффициенты α, β, γ, δ.

Оборудование. Три цветные полоски бумаги для изготовления колец, 15 листов бумаги A4, деревянная линейка, нитки, миллиметровая бумага, скотч и ножницы (по требованию).

Задача 2. Заряд батарейки

Оборудование. Новая батарейка АА, мультиметр, резистор сопротивлением $r = 1{,}0$ Ом, секундомер, вода в стаканчике, миллиметровая бумага.

1. Определите ток короткого замыкания $I_{0,\text{кз}}$, и внутреннее сопротивление R_0 новой (не бывшей в употреблении) батарейки.
2. Найдите заряд q (в А·час), который отдаст батарейка при полной разрядке на постоянном сопротивлении нагрузки.

Вам может быть выдана новая батарейка взамен старой, **но только один раз**.

ВНИМАНИЕ. В некоторых случаях при разрядке батарейка может сильно греться, поэтому проводите длительные измерения, поместив батарейку в контейнер с водой.

Примечание. Во время длительного разряда батарейки даже *кратковременное* изменение сопротивления нагрузки может *значительно* изменить характер последующего разряда из-за эффекта восстановления ЭДС.

При начальных токах разрядки батарейки менее 2 А вам может не хватить времени для определения заряда q.

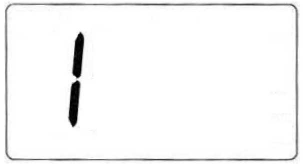


Рис. 4

Если измеряемая мультиметром величина превышает предел измерения, а на дисплее нет символа «зашкаливания» (рис. 4), то показаниям прибора можно доверять.

Для измерения токов используйте режим «10A», и входные гнёзда «COM» и «10ADC», иначе прибор может сгореть.

11 класс

Задача 1. Свободные колебания линейки

Оборудование. Стробоскоп, стальная линейка толщиной $h_1 = (1{,}00 \pm 0{,}01)$ мм, пластмассовая линейка толщиной $h_2 = (2{,}1 \pm 0{,}1)$ мм, зажим, миллиметровая бумага.

Если отклонить в *поперечном* направлении конец зажатой с одного конца упругой линейки и отпустить, то возникнут свободные поперечные колебания. Наименьшая циклическая частота ω таких колебаний определяется плотностью ρ материала линейки, его модулем Юнга E и геометрическими размерами свободного конца линейки: длиной l, шириной b и толщиной h (рис. 5):

$$\omega = \beta E^m \rho^n l^p b^q h^s, \tag{1}$$

где β — безразмерный коэффициент, а m, n, p, q, s — некоторые рациональные числа.

Модуль Юнга определяет упругие свойства материала. По закону Гука относительная деформация стержня под действием силы F, приложенной перпендикулярно его сечению S, равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{ES}.$$

Для стали модуль Юнга $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па.

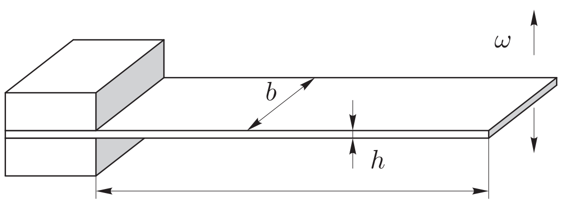


Рис. 5

1. Предложите метод измерения частоты колебаний линейки с помощью стробоскопа.
2. Снимите экспериментальную зависимость наименьшей частоты $\omega(l)$ колебаний стальной линейки.
3. По результатам измерений определите значение коэффициента p в формуле (1).
4. Определите показатели степени m, n, q, s в формуле (1).
5. Определите модуль Юнга материала пластмассовой линейки, считая её поперечное сечение прямоугольником.

Примечание. Стробоскоп — прибор, позволяющий воспроизводить повторяющиеся яркие световые импульсы с заданной частотой. Для включения нажмите и удерживайте «READ». Для регулировки частоты используйте «UP» и «DOWN». Для тонкой настройки нажмите «FINE ADJUST». Для воспроизведения световых импульсов удерживайте нажатой кнопку справа сбоку. Частота мерцаний указана в мин$^{-1}$ (RPM).

Задача 2. Разряд батарейки

Оборудование. Новая батарейка AA, мультиметр в режиме термометра (положение «TEMP»), мультиметр, резистор сопротивлением $r = 1{,}0$ Ом, секундомер, шприц с делениями, вода в стаканчике, калориметр (пенопластовый контейнер), миллиметровая бумага.

1. Определите ток короткого замыкания $I_{0,\text{кз}}$ и внутреннее сопротивление R_0 новой (не бывшей в употреблении) батарейки.
2. Измерьте заряд q (в А · час), который отдаст батарейка при её полной разрядке через минимальное постоянное сопротивление.
3. Измерьте в том же процессе полную теплоту Q_0, выделившуюся в батарейке. Теплоёмкость батарейки $C = 61 \pm 2$ Дж/°C, а удельная теплоёмкость воды $c_\text{в} = 4200$ Дж/(кг · °C).
4. Используя измеренное значение q, определите количество джоулевой теплоты Q_1, которая выделилась в батарейке, и сравните его с Q_0. Считайте, что при длительной разрядке на малом сопротивлении ЭДС $\mathscr{E}$ выданной вам батарейки слабо меняется и равна в среднем $\mathscr{E}_\text{ср} = 1{,}0 \pm 0{,}1$ В

ВНИМАНИЕ. В некоторых случаях при разрядке батарейка может сильно греться, поэтому проводите длительные измерения, поместив батарейку в контейнер с водой.

Примечание. Во время длительного разряда батарейки даже *кратковременное* (порядка нескольких секунд) изменение сопротивления нагрузки может *значительно* изменить характер последующего разряда из-за эффекта восстановления ЭДС.

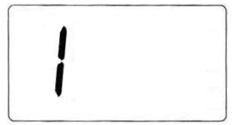


Рис. 6

Если измеряемая мультиметром величина превышает предел измерения, а на дисплее нет символа «зашкаливания» (рис. 6), то показаниям прибора можно доверять.

Для измерения токов используйте режим «10A», и входные гнёзда «COM» и «10ADC».

Вам может быть выдана новая батарейка взамен старой, **но только один раз**.

Возможные решения

9 класс

Задача 1. Падение шарика

1. Найдем коэффициент восстановления k.

Первый способ. Положим доску горизонтально, а рядом вертикально установим линейку. Отметим высоту h_1 порядка 30 см, с которой будем бросать шарик. Замечаем, на какую высоту h_2 подскочил шарик. Устанавливаем на эту высоту лапку и бросаем еще раз, изменяем положение лапки, если шарик поднялся чуть выше или оказался ниже. Снова бросаем шарик. Повторяем, пока не убедимся, что шарик подскакивает именно на эту высоту. Измеряем высоту h_2.

$$mgh_1 = m\frac{v_1^2}{2}, \qquad mgh_2 = m\frac{v_2^2}{2}, \qquad \text{откуда} \qquad k = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}.$$

Второй способ. Отпустим шарик с высоты h и секундомером измерим время t до полной остановки шарика (прекращение звука ударов). Время первого падения шарика $t_0 = \sqrt{2h/g}$, после удара энергия шарика уменьшится в k^2 раз, и шарик поднимется до высоты k^2h. На это уйдёт время $k\sqrt{2h/g}$, столько же времени уйдёт на падение, то есть $t_1 = 2k\sqrt{2h/g}$, $t_2 = 2k^2\sqrt{2h/g}$ и так далее. Таким образом, времена между ударами образуют геометрическую прогрессию со знаменателем k. Полное время до остановки:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}\frac{1+k}{1-k}, \quad \text{откуда} \quad k = \frac{t\sqrt{g/2h}-1}{t\sqrt{g/2h}+1}.$$

Оба способа дают одинаковое (в пределах погрешностей) значение для k, лежащее в диапазоне 0,8–0,9.

2. Выведем зависимость L от h. Шарик падает на плоскость под углом α к нормали со скоростью

$$v_0 = \sqrt{2gH}. \tag{1}$$

Проекция скорости после отскока на перпендикуляр к плоскости равна $kv_0\cos\alpha$, а на плоскость — $nv_0\sin\alpha = nv_0h/l$, где l — длина доски. Второй удар о плоскость произойдет через время $t_п$:

$$t_п = \frac{2kv_0\cos\alpha}{g\cos\alpha} = \frac{2kv_0}{g}.$$

Найдём L:

$$L = (nv_0\sin\alpha)t_п + \frac{gt_п^2\sin\alpha}{2} = \left(\frac{2knv_0^2}{g} + \frac{2k^2v_0^2}{g}\right)\sin\alpha.$$

Подставляя v_0 из (1), получим:

$$L = 4Hk(n+k)\sin\alpha = 4Hk(n+k)\frac{h}{l}.$$

Снимаем зависимость L от h. При каждом измерении делаем 5–8 бросков, чтобы исключить ошибку. Полученные точки занесём в таблицу и построим график. График — прямая линия.

3. По графику находим коэффициент наклона $c = L/\sin\alpha$.

$$c = 4Hk(n+k), \qquad \text{откуда} \qquad n = \frac{c}{4Hk} - k.$$

В наших экспериментах n лежит в диапазоне 0,50–0,65.

Задача 2. Оптическая плотность

Для определения отношения плотностей жидкостей воспользуемся методом гидростатического взвешивания. Поместим стаканчик с первой жидкостью на весы. Для повышения точности обнулим их показания (кнопка «tare»). Полностью погрузим в жидкость шарик на ниточке, не касаясь им дна и стенок стакана. В соответствии с уравнениями статики и третьим законом Ньютона, весы покажут массу жидкости в объёме шарика $m_1 = V\rho_1$. Повторим процедуру со второй жидкостью, предварительно высушив шарик салфеткой, получим $m_2 = V\rho_2$. Отношение плотностей жидкостей равно отношению масс.

Для определения отношения показателей преломления проведём на листе бумаги серединные линии, и построим окружность достаточно большого радиуса. Установим на лист кювету и лазер (рис. 7).

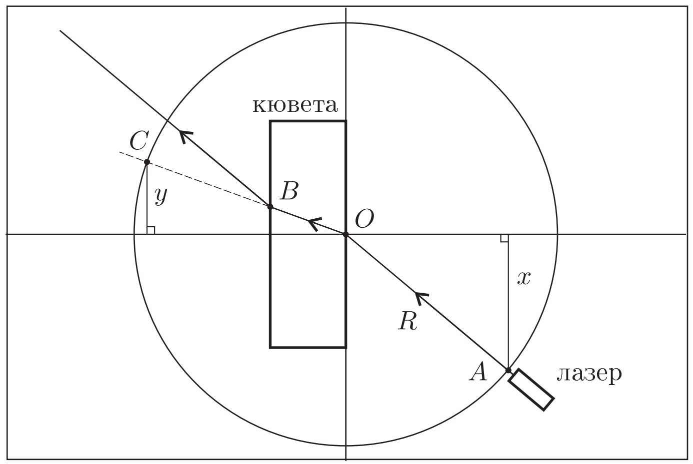


Рис. 7

Для такого хода луча $x/y = n$, где n — показатель преломления жидкости в кювете. При постоянном x проводим измерения для первой и второй жидкости, получаем результаты y_1 и y_2 соответственно. Тогда отношение показателей преломления $n_1/n_2 = y_2/y_1$.

По результатам измерений отношение плотностей равно $\rho_1/\rho_2 = 1{,}25 \pm 0{,}03$, в то время как отношение показателей преломления $n_1/n_2 = 1{,}08 \pm 0{,}05$, с учётом погрешностей измерений можно сделать однозначный вывод, что гипотеза не верна!

10 класс

Задача 1. Стадион

1. Методом размерностей найдём α:

$$[F] = \text{Н}, \qquad [E] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, \qquad [h] = [b] = [d] = \text{м}.$$

$$\text{Н} = \frac{\text{Н}^\alpha}{\text{м}^{2\alpha} \cdot \text{м}^{\beta+\gamma+\delta}}, \quad \text{отсюда} \quad \alpha = 1.$$

2. Из физических соображений, если увеличить силу вдвое ($F_1 = 2F$) и приложить её к двум одинаковым цилиндрам ($b_1 = 2b$), то h не изменится, получаем, что $\gamma = 1$.

3. Склеиваем цилиндр при помощи скотча. Нагружаем цилиндр при помощи бумаги и измеряем силу в весах одного листа бумаги. Измеряем зависимость F от h.

Δh, мм	h, мм	F, $m_б g$
0	63,0	0,00
0	61,0	0,25
0	59,0	0,50
-2	48,0	1,00
-2	34,0	1,50
-2	31,0	2,00
-2,5	26,0	3,00
-2	23,0	4,00
-3	20,5	5,00
-3	19,0	6,00
-4	17,5	7,00
-4	16,5	8,00
-7	15,5	9,00
-9	13,0	10,00

Где Δh — отклонение от начального положения при снятии груза.

При больших нагрузках бумага деформируется необратимо, поэтому закон Гука не выполняется , следовательно формула (1) не верна. При очень маленьких деформациях $h \approx h_0$, а $F \approx 0$, что не соотвествует формуле (1).

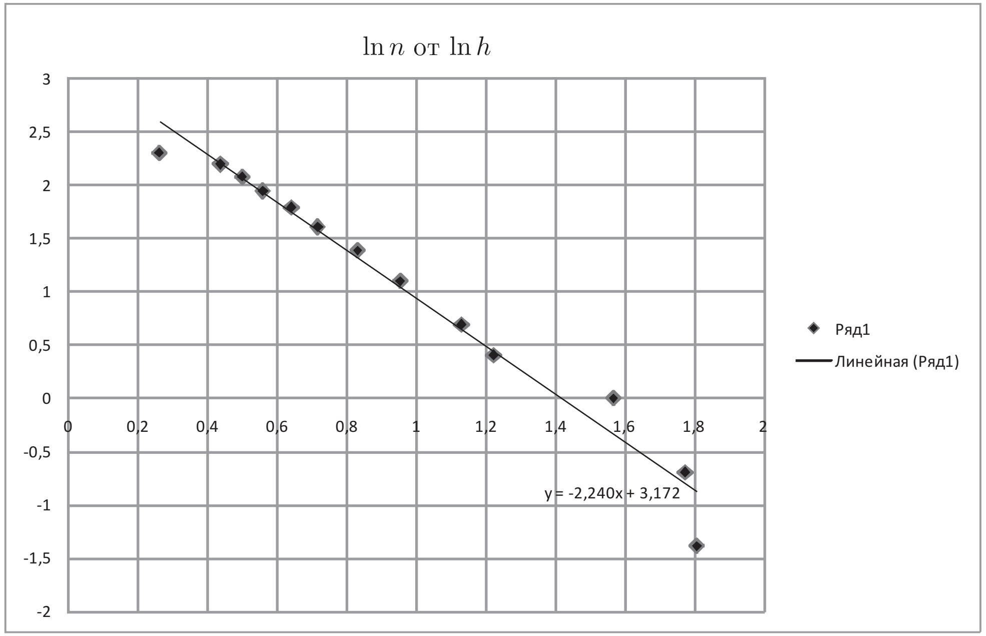


Рис. 8

Из графика (рис. 8):

$\beta = -2{,}2 \pm 0{,}2$.

$h \in [15\,\text{мм}; 35\,\text{мм}]$ — линейный участок (то есть диапазон h в котором выполняется формула (1)).

4. Коэффициент δ определён методом размерностей из α, β, и γ: если $\beta \approx -2$, $\alpha = 1$, $\gamma = 1$, то $\delta = 3$.

Задача 2. Заряд батарейки

1. Измерим вольтметром ЭДС новой батарейки $\mathscr{E} = 1{,}62\,\text{В}$.

2. Замкнем провода, припаянные к батарейке на резистор $r = 1\,\text{Ом}$, предварительно присоединив вольтметр к одному конкретному проводу, припаянному к батарейке (рис. 9). В той же схеме измеряем напряжение на резисторе r. Получаем сопротивление провода из отношения напряжений.

$$U_1 = 14{,}7\,\text{мВ}, \quad U_2 = 980\,\text{мВ}, \quad r_1 = 15\,\text{мОм}.$$

Аналогичным способом находим сопротивление второго провода — $r_2 = 15$ мОм .

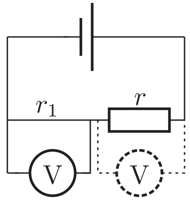


Рис. 9

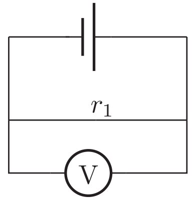


Рис. 10

3. Замыкаем батарейку накоротко, предварительно подсоединив вольтметр к одному из проводков (рис. 10). Получаем ток $I = U/r_1$. У новой батарейки $\mathscr{E} - (r_0 + r_1 + r_2)I = 0$, где r_0 — внутреннее сопротивление батарейки. Получаем,

$$U = 162\,\text{мВ}, \quad I = 10{,}8\ \text{А}, \quad r_0 = 0{,}12\,\text{Ом}.$$

Измеренный ток не является током короткого замыкания. Ток короткого замыкания считаем по формуле $\mathscr{E}/r_0 = 13{,}5\,\text{А}$.

4. Предыдущие измерения делались за пренебрежимо малое время. Замыкание на 1 Ом, хотя и даёт правильный результат, не является разумным, так как измерения могут занять слишком много времени, примерно 1,5 часа. Для измерения с замыканием на амперметр достаточно 40 минут.

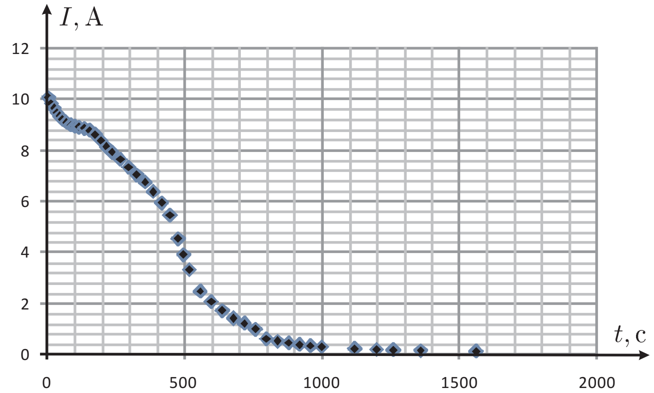


Рис. 11

Последний участок графика (рис. 11) экстраполируется линейной зависимостью или же экспонентой. Посчитав площадь под графиком, найдем протекший заряд:

$$q = 1{,}25 \pm 0{,}25\ \text{Ач}.$$

11 класс

Задача 1. Свободные колебания линейки

Введение. Закрепим линейку на краю стола, используя зажим. Возбудим колебания, отклоняя линейку в поперечном направлении, и направим перпендикулярно плоскости колебания луч стробоскопа. Предположим, что конец линейки совершает гармонические колебания с частотой $\omega_л$, а стробоскоп мерцает с частотой $\omega_с$, то есть мы видим линейку только в моменты времени $t_n = n(2\pi/\omega_с)$. Координата конца линейки в моменты, когда мы её видим, $x_n = x_0 \cos(2\pi n(\omega_л/\omega_с) + \varphi_0)$. Линейка «замрёт», если частота колебания линейки будет кратна частоте стробоскопа, то есть

$$\omega_л = k\omega_с, \quad k = 1,2,\ldots.$$

Причём чем ближе $\omega_л$ к частоте, кратной $\omega_с$, тем медленнее колеблется изображение линейки в свете стробоскопа. Уменьшая $\omega_с$ с заведомо большой частоты, мы увидим, как колебания изображения линейки замедляются и, подобрав такую $\omega_с$, при которой линейка «замрёт» в первый раз, найдём $\omega_л = \omega_с$.

1. Снимем зависимость $\nu(l)$:

l, мм	ν, об/мин	l, мм	ν, об/мин	l, мм	ν, об/мин
70	8650	150	2060	230	910
80	6850	160	1850	240	850
90	5550	170	1720	250	770
100	4470	180	1450	260	720
110	3700	190	1300	270	660
120	3140	200	1170	280	620
130	2740	210	1050	290	580
140	2350	220	980	300	540

2. Построим график зависимости $\ln\omega(\ln l)$, из углового коэффициента $k \approx -2$ найдём что $p = -2$.

3. От ширины линейки частота колебаний не зависит, то есть $q = 0$. Тогда, решая методом размерностей $\omega = \beta E^m \rho^n l^p h^s$, получим: $m = 1/2$, $n = -1/2$, $s = 1$.

4. Теперь, когда мы знаем вид зависимости частоты от остальных параметров, можно найти модуль Юнга материала пластмассовой линейки. Для этого нам нужно знать отношение плотностей стали и пластмассы, которое можно найти, зная геометрические размеры и отношение масс линеек. Последнее находится с помощью уравновешивания линеек на краю стола и правила моментов (рис. 12). Положение центра масс металлической линейки находится на расстоянии 164 мм от ее края. Положение опоры (края стола) при уравновешивании линеек находится на расстоянии 126 мм. Таким образом, $m_{ст}/m_{пл} = 63/19$. Геометрические размеры линеек, измеренные другой линейкой: $l_{ст} = 330$ мм, $l_{пл} = 313$ мм, $b_{ст} = 30$ мм, $b_{пл} = 25$ мм.

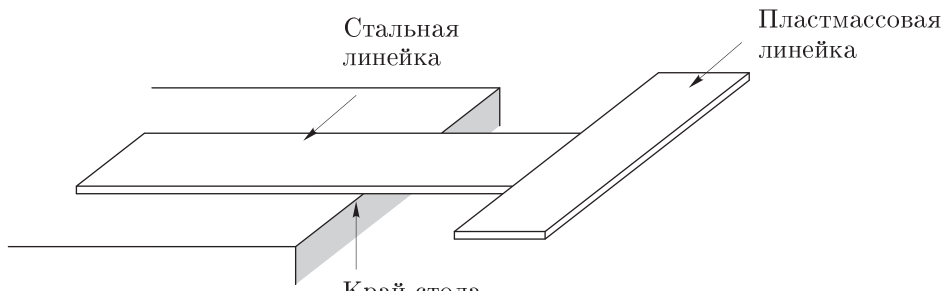


Рис. 12

Измерив частоту колебаний при длине свободной части пластмассовой линейки, например, 160 мм, получаем значение 1130 мин$^{-1}$. В итоге получаем:

$$E_{пл} = E_{ст} \cdot \left(\frac{\omega_{пл}(l_0)}{\omega_{ст}(l_0)}\right)^2 \left(\frac{h_{ст}}{h_{пл}}\right)^2 \frac{m_{пл} \cdot l_{ст} \cdot h_{ст} \cdot b_{ст}}{m_{ст} \cdot l_{пл} \cdot h_{пл} \cdot b_{пл}} =$$

$$= 2{,}1 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{1130}{1850}\right)^2 \left(\frac{1}{2{,}1}\right)^2 \frac{19 \cdot 330 \cdot 1 \cdot 30}{63 \cdot 313 \cdot 2{,}1 \cdot 25} \approx 3 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Более точным решением может быть снятие зависимости $\omega(l)$ для пластмассовой линейки, построение двух графиков $\omega(1/l^2)$ и вычисление отношения двух угловых коэффициентов, откуда аналогичным образом вычисляется $E_{пл}$. Для оценки погрешности модуля Юнга считаем, что $\Delta\omega = 10$ мин$^{-1}$, погрешность измерения любой длины линейкой $\Delta l = 1$ мм, такое же значение имеет погрешность определения положения опоры при измерениях, необходимых для определения отношения масс линеек. Из вышесказанного следует, что основной вклад в погрешность внесут измерения: 1) ширины линеек ($\approx 4\%$), 2) разности положений опор ($\approx 3\%$), а также указанная в условии погрешность определения толщины ($\approx 20\%$, т.к. в окончательный ответ толщина входит в третьей степени). Окончательно погрешность результата $\approx 30\%$.

Задача 2. Разряд батарейки

1. Подключим амперметр в режиме вольтметра к батарейке и найдём её начальную ЭДС $\mathscr{E}_0 = 1{,}62 \pm 0{,}01$ В. Затем измерим напряжение на выданном резисторе, ненадолго подключив его к батарейке $U_0 = 1{,}40 \pm 0{,}01$. Таким образом, зная сопротивления резистора $r = 1{,}0$ Ом можно вычислить $I_{0,кз}$ и R_0:

$$R_0 = \frac{\mathscr{E}_0 - U_0}{U_0} r = 0{,}16 \text{ Ом}, \qquad I_{0,кз} = \frac{\mathscr{E}_0}{R_0} = \frac{\mathscr{E}_0 U_0}{(\mathscr{E}_0 - U_0) r} = 10 \text{ А}.$$

Оценим погрешности:

$$\left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2 \approx \left(\frac{\Delta(\mathscr{E}_0 - U_0)}{\mathscr{E}_0 - U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 = 0{,}09^2 + 0{,}05^2, \qquad \left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 \approx \left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2$$

$$R_0 = 0{,}16 \pm 0{,}02 \text{ Ом},, \qquad I = 10 \pm 1 \text{ А}.$$

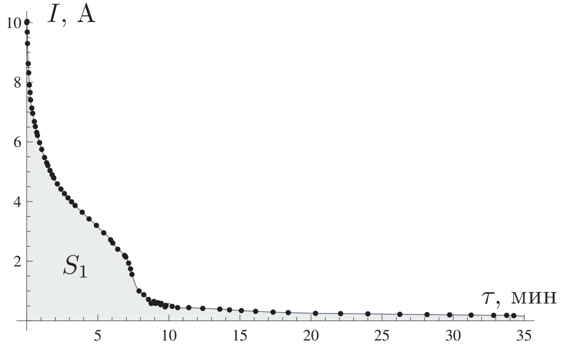


Рис. 13

2. Поскольку в условии спрашивалось минимальное постоянное сопротивление, а таким сопротивлением обладает амперметр на пределе «10А», то разряжать батарейку нужно через него. Положим батарейку в калориметр, нальём небольшое количество воды $V = 20$ мл, чтобы залить батарейку полностью. Опустим также в воду термопару, чтобы следить за изменением температуры. Наконец, запустим секундомер, замкнём батарейку на амперметр и будем следить, за показаниями трёх приборов, включая мультиметр с термопарой.

Полученные значения $I(\tau)$ и $t(\tau)$ занесём в таблицу и построим на графиках (рис. 13 и 14). Здесь и далее τ — время, а t — температура в °C. Батарейка разряжается достаточно долго: будем записывать измерения в течение 20–30 мин. Также заметим, что в начале имеет смысл записывать показания тока как можно чаще, а примерно через 10 мин достаточно одного измерения в минуту.

Так как $I = dq/d\tau$, то протёкший заряд q_1 будет равен площади под графиком $I(\tau)$:

$$q_1 = S_1 = 1{,}00 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Поскольку в конце измерений ток уменьшается слабо, но при этом не является нулевым, то требуется оценить оставшееся время τ', необходимое для полной разрядки батарейки и заряд q', который при этом выделится. Для этого заметим, что в течение последних 20 мин ток спадал линейно, поэтому линейная аппроксимация даст нам хорошую оценку этих величин.

$$\tau' = \frac{I'}{k} = \frac{0{,}24 \text{ А}}{0{,}39 \text{ А/ч}} \approx 0{,}6 \text{ часа}, \qquad q' = \frac{1}{2}\tau' I' = 0{,}07 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, малость этой величины по сравнению с q_1 позволяет нам действительно обрывать измерения на 30 минутах. Погрешность определения q_1 найдём из графика. Первые $\tau_1 \approx 10$ мин ток менялся быстро, поэтому ошибка определния тока составляла порядка $\Delta I_1 = 0{,}05$ А. Затем, когда показания амперметра менялись не так резко, погрешность определения тока $\Delta I_2 = 0{,}01$ А.

Также у нас есть погрешность определния площади под графиком. Другими словами:

$$\Delta q_1 = \Delta q = \Delta I_1 \tau_1 + \Delta I_2(\tau_\Sigma - \tau_1) + \Delta S_1 \approx 0{,}05 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Окончательно:

$$q = q_1 + q' = 1{,}07 \pm 0{,}05 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

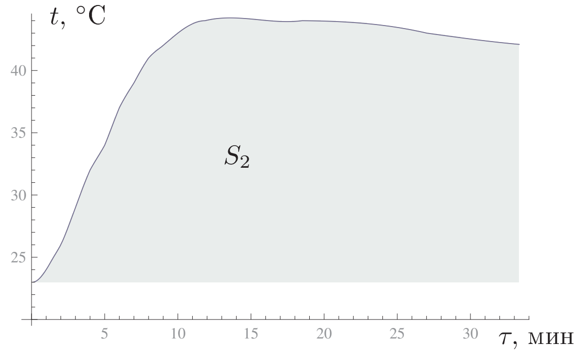


Рис. 14

3. Теплоёмкость всей системы:

$$C_0 = C + c_\text{в}\rho V = 145 \pm 4 \text{ Дж},$$

Поэтому, когда система нагрелась к концу эксперимента на $\Delta t_1 = 20 \pm 2\,$°C, то запасённое тепло по сравнению с начальным состоянием:

$$Q_\text{з} = C_0 \Delta t_1 = 2{,}9 \pm 0{,}3 \text{ кДж}.$$

Построим график температуры от времени. Из графика видно, что сначала температура увеличивалась, а потом вышла на плато: тепловые потери сравнялись с выделяемой на батарейке мощности. Оценим тепловые потери из закона:

$$P = \alpha(t - t_0),$$

где P — мощность тепловых потерь, t — температура воды в калориметре, $t_\text{к}$ — комнатная температура, α — коэффициент теплопотерь, который в течение одного эксперимента можно считать постоянным. Поскольку $P = dQ/d\tau$, то тепловые потери $Q_\text{п}$:

$$Q_\text{п} = \int P d\tau = \alpha \int (t - t_\text{к}) d\tau.$$

Последний интеграл есть не что иное, как площадь S_2 между графиком нагрева и прямой соотвествующей комнатной температуре.

Чтобы определить коэффициент α, разомкнём цепь и измерим кривую остывания $t_{\text{ост}}(\tau)$. Так как $t_{\text{ост}} = t_{\text{к}} + (t_0 - t_{\text{к}})e^{-\alpha t/C_0}$, то построив график $\ln(t_{\text{ост}} - t_{\text{к}})$ от времени определим угловой коэффициент и вычислим $\alpha = 0{,}04 \pm 0{,}01$ Вт/°C.

Полное тепло, выделившееся в батарейке найдём как сумму:

$$Q_0 = Q_{\text{з}} + Q_{\text{п}} = 4{,}1 \pm 0{,}7 \text{ кДж}.$$

4. Поскольку сопротивлением амперметра при разрядке можно пренебречь, то практически вся работа батарейки A переходит в джоулево тепло Q_1:

$$Q_1 = A = \mathscr{E}_{\text{ср}} q = 1{,}07 \text{Вт} \cdot \text{ч} = 3{,}8 \pm 0{,}5 \text{ кДж}.$$

Видно, что в пределах погрешности $Q_1 = Q_0$.