

**Задание 9.1. Плотность провода III (Чжан М., Кармазин С.).**

Вам выдан образец одножильного провода длиной  $L = 600$  мм. На половине его длины изоляция удалена. Определите массу, объём и плотность ( $m_m$ ,  $V_m$ ,  $\rho_m$ ) металла, а также массу, объём и плотность ( $m_i$ ,  $V_i$ ,  $\rho_i$ ) изоляции провода.



В процессе решения поставленной задачи используйте провод в качестве рычага и исследуйте зависимость какой-либо длины на рычаге в положении равновесия от массы размещённого на нём груза. Постройте график полученной зависимости в координатах, в которых эта зависимость является линейной. Погрешность оценивать не требуется.

**Примечание 1.** Длина окружности  $X = \pi D$ , где  $D$  – диаметр этой окружности. Площадь круга  $S = \pi D^2/4$ ;  $\pi = 3,14$ .

**Примечание 2.** Изгибать провод запрещено!

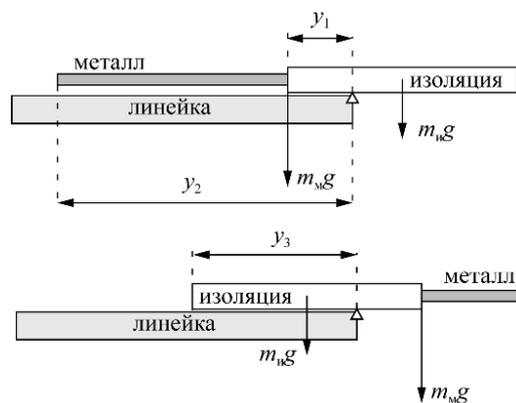
**Примечание 3.** Снимать изоляцию с проволоки категорически запрещено.

**Оборудование:** образец провода длиной  $L = 600$  мм, линейка 40 см, 2 шприца объёмом 5 мл, и 1 мл; стакан с водой, гибкая трубка, нитка, салфетка, миллиметровая бумага для построения графика.

**Указание организаторам:** Лучше всего подойдёт медный одножильный провод сечением  $2,5 \text{ мм}^2$  в изоляции. Каждому участнику необходимо выдать один **прямой** отрезок провода длиной 600 мм, с половины которого снята изоляция. Длина нитки 20 – 25 см. Провод в изоляции должен вставляться в прозрачную трубку, а трубка надеваться на подыгольный конус шприца. Длина трубки на несколько сантиметров больше половины длины провода, т.е. 33 – 35 см.

**Решение.** В данном решении использовался медный провод сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ .

1. Определим отношение  $\alpha = m_M/m_I$ . Для повышения точности сделаем это трижды. Расположим центр тяжести системы провод - изоляция на краю линейки при двух положениях провода и измерим три различных расстояния  $y_1, y_2, y_3$  (рис.1).



Ниже записано правило моментов для каждого измерения, приведены экспериментальные значения  $y_1, y_2$ , и  $y_3$ , вычислены значения  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и среднее значение  $\alpha = 5,83$ .

$$m_M y_1 = m_I \left( \frac{L}{4} - y_1 \right); \quad \alpha_1 = \frac{m_M}{m_I} = \frac{L}{4y_1} - 1; \quad y_1 = 22 \text{ мм}; \quad \alpha_1 = 5,82$$

$$m_M \left( y_2 - \frac{L}{2} \right) = m_I \left( \frac{3L}{4} - y_2 \right); \quad \alpha_2 = \frac{m_M}{m_I} = \frac{\frac{3}{4}L - y_2}{y_2 - \frac{L}{2}}; \quad y_2 = 323 \text{ мм}; \quad \alpha_2 = 5,52$$

$$m_M \left( \frac{L}{2} - y_3 \right) = m_I \left( y_3 - \frac{L}{4} \right); \quad \alpha_3 = \frac{m_M}{m_I} = \frac{\left( y_3 - \frac{L}{4} \right)}{\left( \frac{L}{2} - y_3 \right)}; \quad y_3 = 279 \text{ мм}; \quad \alpha_3 = 6,14$$

$$\alpha_{\text{ср}} = 5,83 \quad (1)$$

2. На край изоляции провода повесим шприц (рис.2).

Массу пустого шприца обозначим  $m_0$ . Установим зависимость длины изоляции  $X$ , расположенной левее центра тяжести системы, от массы воды  $m_B$  в шприце. Данные запишем в таблицу.

Табл.1

№	$m_B$ , г	$X$ , мм	$Z$
1	0	80	0,68
2	1	92	0,72
3	2	100	0,75
4	3	110	0,79
5	4	119	0,83
6	5	127	0,87

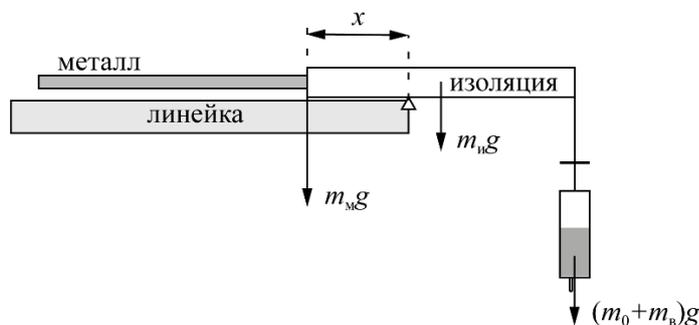


Рис.2

Уравнение моментов для системы провод-шприц

$$m_M X = m_I \left( \frac{L}{4} - X \right) + m_0 \left( \frac{L}{2} - X \right) + m_B \left( \frac{L}{2} - X \right) \quad \text{или} \quad \frac{4X}{L} = \frac{m_I + 2m_0 + 2m_B}{m_M + m_I + m_0 + m_B}. \quad (2)$$

Как видно, зависимость  $X(m_B)$  нелинейная. Линеаризуем её. Вычтем 2 из обеих частей уравнения (2), приведём правую часть к общему знаменателю, поменяем знак и приравняем обратные величины получившихся выражений:

$$\frac{1}{2 - \frac{4X}{L}} = \frac{m_M + m_{и} + m_0}{2m_M + m_{и}} + \frac{1}{2m_M + m_{и}} m_B \quad (3)$$

Левая часть равенства (3) является линейной функцией  $m_B$ . Введём обозначение

$$Z = \frac{1}{2 - \frac{4X}{L}}$$

и занесём значения  $Z$  в таблицу. График зависимости  $Z(m_B)$  представлен на рис.3.

С учётом (1) и (3) по наклону прямой находим  $m_{и} = 2,14$  г,  $m_M = 12,44$  г.

Непосредственное взвешивание разделённых частей провода даёт значения

$$m_{и} = 2,09 \text{ г}, m_M = 12,57 \text{ г}.$$

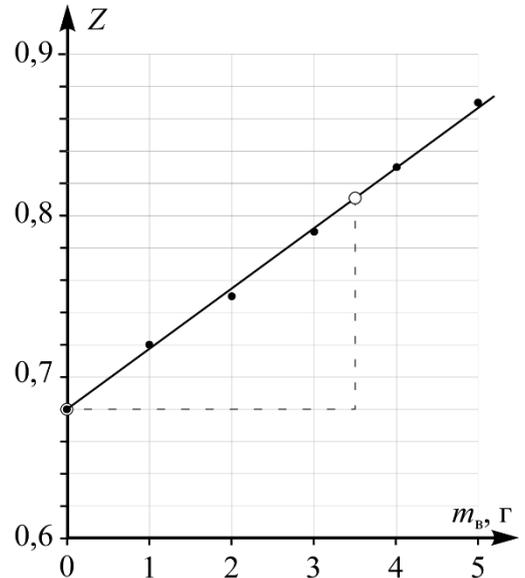


Рис.3

3. Одним из возможных способов измерения диаметра металлической части провода и внешнего диаметра изоляции является прокатывание по линейке. Однако, учитывая длину провода и наличие только одной линейки, реализовать прокатывание с достаточным количеством оборотов (не менее 10) без проскальзывания весьма затруднительно. Тем не менее, использование этого способа при тщательном проведении эксперимента может дать приемлемые результаты, и его тоже следует засчитывать при оценивании работы.

Предлагается измерять объём провода без изоляции и в изоляции путём измерения (при помощи шприца) объёма воды, которая заполняет гибкую трубку с проводом и без провода. В этом случае вычисления диаметров металлической части и изоляции не требуется. Для повышения точности измерений следует использовать инсулиновый шприц объёмом 1 мл.

В табл.2 приведены результаты соответствующих измерений с использованием следующих обозначений:

$V_T$  – объём воды в пустой трубке

$V_{TM}$  – объём воды в трубке с металлической частью провода длиной  $L/2$

$V_M$  – объём металла в проводе длиной  $L$

$V_{TI}$  – объём воды в трубке с проводом в изоляции длиной  $L/2$

$V_{и вн}$  – внешний объём изоляции

$V_{и}$  – объём изоляции (внешний объём минус объём металла внутри).

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике  
Региональный этап. Экспериментальный тур. 25 января 2020 г.

Табл.2

$V_T, \text{см}^3$	$V_{TM}, \text{см}^3$	$V_M, \text{см}^3$	$V_{TI}, \text{см}^3$	$V_{и\text{ вн}}, \text{см}^3$	$V_{и}, \text{см}^3$
2,65	1,92	1,46	0,37	2,28	1,55

Вычисляем плотности:

$$\rho_M = \frac{m_M}{V_M} = \frac{12,44}{1,46} = 8,52 \text{ г/см}^3, \text{ что на 4\% отличается от табличной плотности меди,}$$

$$\rho_{и} = \frac{m_{и}}{V_{и}} = \frac{2,14}{1,55} = 1,38 \text{ г/см}^3. \text{ Непосредственное измерение плотности изоляции с помощью гидростатического взвешивания даёт результат } \rho_{и} = 1,33 \text{ г/см}^3.$$

**Критерии оценивания:**

1. Определено отношение  $\alpha$  массы металла к массе изоляции в проводе с точностью не хуже 10% посредством измерения плеч в двух различных положениях равновесия 1 балл  
если отношение определено по результатам однократного измерения, то 0,5 балла
2. Идея исследования зависимости длины плеч в положении равновесия от массы воды в шприце и описание введённых обозначений 1 балл
3. Таблица результатов измерения зависимости длины плеч в положении равновесия от массы воды в шприце (указаны физические величины и единицы их измерения). Если нанесено не менее 5 точек, то 2 балла  
если нанесены 2 или 3 точки, то 1 балл
4. Записана формула исследованной зависимости 1 балл
5. Выполнена линеаризация исследованной зависимости (введены новые переменные) 1 балл
6. Построен график линейной зависимости 2 балла
  - подписаны оси (величины и единицы измерения) 0,5 балла
  - оформлен масштаб на осях 0,5 балла
  - правильно нанесены экспериментальные точки 0,5 балла
  - проведена **прямая** линия 0,5 балла
7. Из графика определена масса металла (с точностью не хуже 10%) (11,2...13,7 г) 1 балл
8. Из графика определена масса изоляции (с точностью не хуже 10%) (1,9...2,4 г) 1 балл  
При вычислении масс металла и изоляции путём решения системы необходимого количества уравнений **пункты 5 и 6 не оцениваются.**
9. Измерение объёма металла с помощью гибкой трубки, шприца и воды с точностью не хуже 10% (1,3...1,6 см<sup>3</sup>) 1 балл
10. Измерение объёма изоляции с помощью гибкой трубки, шприца и воды с точностью не хуже 10% (1,4...1,7 см<sup>3</sup>) 2 балла  
Если объёмы определены с указанной точностью методом прокатывания, то пункты 9 и 10 засчитываются полным баллом.

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике  
Региональный этап. Экспериментальный тур. 25 января 2020 г.

11. Вычисление плотности металла с точностью не хуже 15 % (7,2...9,8 г/см<sup>3</sup>) 1  
балл
12. Вычисление плотности изоляции с точностью не хуже 15 % (1,2...1,6 г/см<sup>3</sup>) 1  
балл

Если значения массы и объема не попадают в указанный диапазон, то результат плотности не засчитывается в любом случае