

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике

Региональный этап

25 января 2020 г.

Задание 9.1. Плотность провода (III). Вам выдан образец одножильного провода длиной $L = 600$ мм. На половине его длины изоляция срезана. Определите массу, объём и плотность (m_m, V_m, ρ_m) металла, а также массу, объём и плотность (m_i, V_i, ρ_i) изоляции провода.

В процессе решения поставленной задачи используйте провод в качестве рычага и исследуйте зависимость длины какой-либо части провода 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.

Задание 9.2. Серый ящик – магазин. С помощью серого ящика, содержащего источник напряжения U_0 и «магазин» сопротивлений (набор пяти резисторов, включённых последовательно) (рис.1), определите величины внутренних сопротивлений R_{A1} , R_{A2} и R_{A3} мультиметра, используемого в качестве амперметра в диапазонах 200 мА, 20 мА, и 2000 мкА. Для выполнения задания исследуйте зависимость силы тока через амперметр от величины сопротивления в цепи его включения. Выведите формулу, связывающую измеренные вами физические величины между собой. Постройте график полученной зависимости в координатах, в которых эта зависимость является линейной.

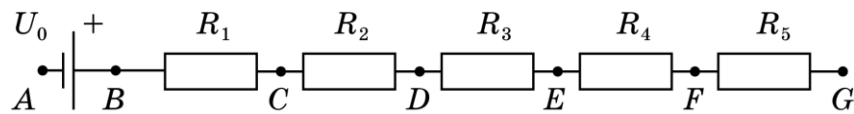


Рис.1

Оборудование: серый ящик; мультиметр; два провода штекер-крокодил, два провода крокодил-крокодил, миллиметровая бумага для построения графиков (3 листа формата А5).

Примечания:

1. Мультиметр в режиме **амперметра** разрешается подключать только (**строго!!**) к контактам B и C серого ящика.
2. Пользоваться другими режимами мультиметра **можно**.
3. Тщательно продумывайте последовательность своих действий и подробно описывайте их. В случае если вы «сожжёте» предохранителя, находящегося внутри мультиметра, его замена на исправный производится не будет.
4. Источник напряжения считайте идеальным.
5. Если зависимость какой-либо физической величины Y от другой величины X представляет собой дробь, в числителе которой имеется только одно слагаемое, а в знаменателе несколько слагаемых, то анализ этой зависимости существенно упрощается, если перейти к равенству обратных величин левой и правой части уравнения.

Задание 9.1. Плотность провода III

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

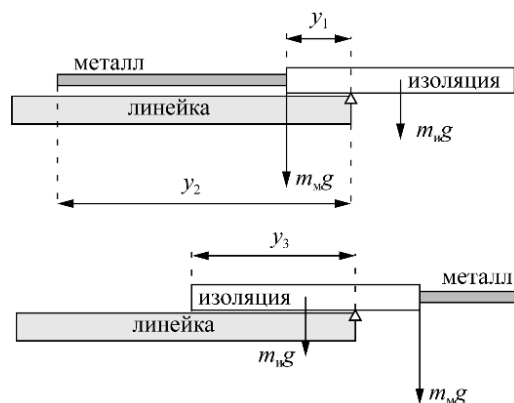
Примечание 3. Снимать изоляцию с проволоки категорически запрещено.

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

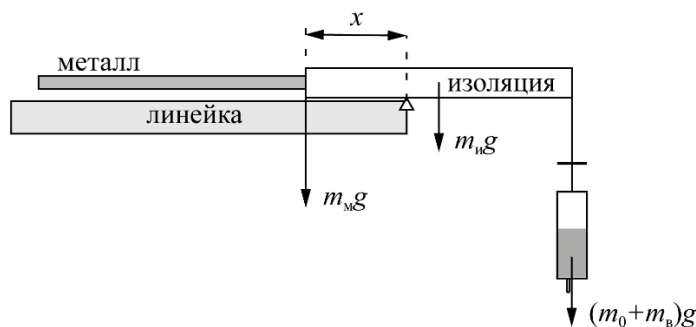


Рис.2

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:

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

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 $m_{II} = 2,14$ г, $m_M = 12,44$ г.

Непосредственное взвешивание разделённых частей провода даёт значения

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

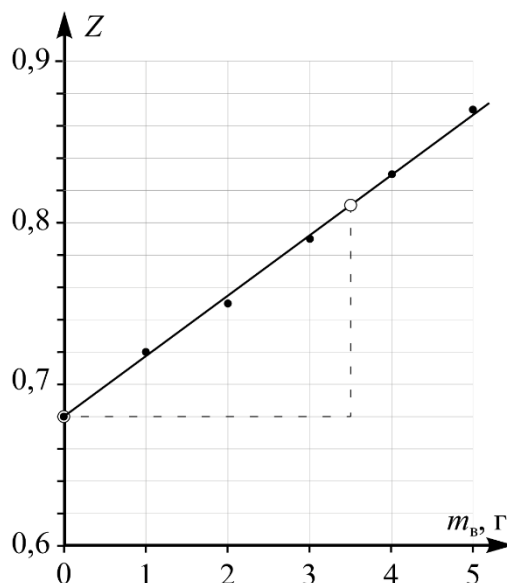


Рис.3

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 α 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 линеаризации 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%) 1 балл
 8. Из графика определена масса изоляции (с точностью не хуже 10%) 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 балл
 10. Измерение объёма изоляции с помощью гибкой трубки, шприца и воды с точностью не хуже 10% 2 балла
- Если объёмы определены с указанной точностью методом прокатывания, то пункты 9 и 10 засчитываются полным баллом.
11. Вычисление плотности металла с точностью не хуже 15 % 1 балл
 12. Вычисление плотности изоляции с точностью не хуже 15 % 1 балл

Задание 9.2. Серый ящик – магазин. С помощью серого ящика, содержащего источник напряжения U_0 и «магазин» сопротивлений (набор пяти резисторов, включённых последовательно) (рис.1), определите величины внутренних сопротивлений R_{A1} , R_{A2} и R_{A3} мультиметра, используемого в качестве амперметра в диапазонах 200 мА, 20 мА, и 2000 мкА. Для выполнения задания исследуйте зависимость силы тока через амперметр от величины сопротивления в цепи его включения. Выведите формулу, связывающую измеренные вами физические величины между собой. Постройте график полученной зависимости в координатах, в которых эта зависимость является линейной.

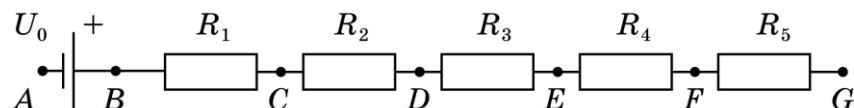


Рис.1

Оборудование: серый ящик; мультиметр; два провода штекер-крокодил, два провода крокодил-крокодил, миллиметровая бумага для построения графиков (3 листа формата А5).

Примечания:

1. Мультиметр в режиме амперметра разрешается подключать только (**строго!!**) к контактам B и C серого ящика.
2. Пользоваться другими режимами мультиметра **можно**.
3. Тщательно продумывайте последовательность своих действий и подробно описывайте их. В случае сжигания предохранителя, находящегося внутри мультиметра, его замена на исправный производиться не будет.
4. Источник напряжения считайте идеальным.
5. Если зависимость какой-либо физической величины Y от другой величины X представляет собой дробь, в числителе которой имеется только одно слагаемое, а в знаменателе несколько слагаемых, то анализ этой зависимости существенно упрощается, если перейти к равенству обратных величин левой и правой части уравнения.

Указание для организаторов. Серый ящик можно собрать в любой коробочке (например, в футляре для зубной щетки). На внешнюю сторону коробочки должно быть выведено 7 контактов (например, винты М3 с гайкой), с обратной стороны к которым через контактный лепесток припаяны резисторы и выводы от держателя обычной пальчиковой батарейки типа АА. Величины сопротивлений примерно следующие: $R_1=5\text{ Ом}$, $R_2=10\text{ Ом}$, $R_3=20\text{ Ом}$, $R_4=40\text{ Ом}$, $R_5=80\text{ Ом}$. Контакты на поверхности коробочки должны быть подписаны А, В, С, D, E, F и G – в соответствии со схемой на рис.1.

Приведённые значения резисторов позволяют выполнить задание на мультиметре типа 830В. При наличии мультиметров другого типа может потребоваться корректировка указанных значений. Каждому участнику олимпиады необходимо выдать два провода штекер-крокодил и два провода крокодил-крокодил.

Возможное решение. С помощью мультиметра в режиме омметра определим величины резисторов в сером ящике: $R_1=5\text{ Ом}$, $R_2=10\text{ Ом}$, $R_3=20\text{ Ом}$, $R_4=40\text{ Ом}$, $R_5=80\text{ Ом}$.

1. С помощью мультиметра в режиме вольтметра определим напряжение источника: $U_0 = 1,55\text{ В}$.

2. Подключим амперметр к контактам В и С серого ящика, а контакт А соединим с одним из контактов D-G (замкнём цепь). Таким образом, амперметр оказывается подключённым к делителю напряжения по схеме, приведённой на рис.2.

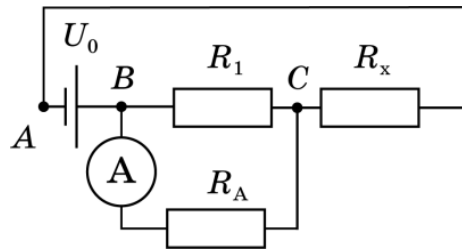


Рис.2

3. Обозначим внутреннее сопротивление амперметра R_A и вычислим, как зависит сила тока I через амперметр от величины сопротивления R_x :

$$I = \frac{U_0}{R_x + \frac{R_1 R_A}{R_1 + R_A}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_A} = \frac{U_0 R_1}{R_x R_1 + R_x R_A + R_1 R_A} \text{ или}$$

$$\frac{1}{I} = \left(\frac{R_1 + R_A}{U_0 R_1} \right) R_x + \frac{R_A}{U_0}. \quad (1)$$

Видно, что I^{-1} является линейной функцией R_x .

4. Установим на амперметре предел измерения 20 мА. Замыкая проводом контакты серого ящика в различных комбинациях, снимем зависимость I от R_x и вычислим значения I^{-1} . Результаты заносим в таблицу 1.

(табл.1).

R_x , Ом	I , mA	$1/I$, 1/A
150	3,35	299
130	3,88	258
110	4,60	217
90	5,52	181
80	6,18	162
70	7,11	141
50	9,77	102

5. Построим график полученной зависимости. (Рис.3). Из графика находим

$$\left(\frac{R_1 + R_A}{U_0 R_1} \right) = \frac{\Delta(1/I)}{\Delta R_x} = 1,94 \text{ В}^{-1}.$$

И, соответственно, $R_A = 10,0$ Ом.

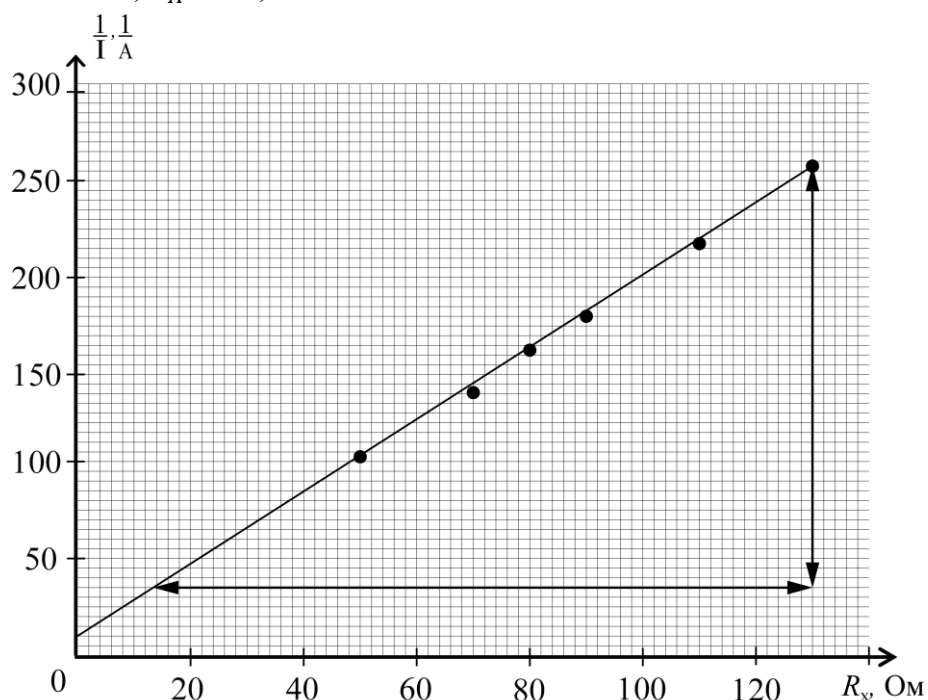


Рис.3

Аналогичным методом на диапазоне 2 мА получаем $R_A = 98$ Ом, а на диапазоне 200 мА получаем $R_A = 1,4$ Ом. В последнем случае сопротивление амперметра сравнимо с внутренним сопротивлением источника напряжения, которое для щелочной батарейки типа АА составляет величину порядка 0,5 Ом и, следовательно, для более точного определения R_A в диапазоне 200 мА батарейку нельзя считать идеальной.

Находить величину R_A следует именно по наклону прямой, описываемой уравнением (1). Определять эту величину по точке пересечения прямой с вертикальной осью не следует, так как при оптимальном для построения графика масштабе эта точка находится слишком близко к нулю.

Следует также заметить, что особенностью предложенного метода определения R_A является возможность использования одного делителя напряжения для трёх пределов измерения амперметра. Это обусловлено тем, что текущий по делителю минимальный ток порядка 0,01 А на разных диапазонах по-разному распределяется между R_1 и амперметром.

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

В диапазоне 2 мА через амперметр течёт 4,8% общего тока ($R_A = 98 \text{ Ом}$), в диапазоне 20 мА – 33% и в диапазоне 200 мА порядка 75-80%. Таким образом удаётся исследовать зависимость I от R_x во всех диапазонах без каких-либо изменений в схеме включения амперметра.

Включение амперметра последовательно с делителем напряжения не даёт возможности определить R_A в диапазоне 2 мА, так как минимальная сила тока в этом случае будет порядка 6 мА, что в 3 раза превышает предел измерения прибора. В диапазонах 20 мА и 200 мА исследование в таком режиме возможно, и оно должно подтверждать полученные результаты.

Критерии оценивания.

- | | |
|--|------------|
| 1. Измерены величины резисторов в сером ящике (по 0,3 за каждый) | 1,5 балла |
| 2. Измерено напряжение источника U_0 | 0,5 балла |
| 3. Выведена формула зависимости силы тока I от изменяемого сопротивления R_x . | 2 балла |
| 4. Выполнена линейризация полученной зависимости | 2 балла |
| 5. Исследованы зависимости $I(R_x)$ для 3 режимов (таблицы), по 1 баллу за каждый режим
если нанесено менее 7 точек в одном режиме – по 0,5 за режим. | 3 балла |
| 6. Построение графиков | 3 балла |
| по 1 баллу за каждый график; каждый график оценивается по 4 параметрам: | |
| подписаны оси (величины и единицы измерения) | 0,25 балла |
| оформлен масштаб на осях | 0,25 балла |
| правильно нанесены экспериментальные точки | 0,25 балла |
| проведена прямая линия | 0,25 балла |
| 7. По угловым коэффициентам прямых на графиках вычислены значения внутренних сопротивлений мультиметра R_{A1} , R_{A2} и R_{A3} (за каждый диапазон по 1 баллу). | 3 балла |

Примечание. Если линейризация измеренной зависимости не проведена и графики не построены, но величины R_{A1} , R_{A2} и R_{A3} определены по 2 измерениям с точностью не хуже 10% путём решения систем уравнений, то не оцениваются пункты 4 и 6, а за пункт 5 может быть получено не более 1,5 баллов.

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике

Региональный этап

25 января 2020 г.

Задание 10.1. Газировка.

Часть 1. (8 баллов). С помощью выданного вам оборудования определите давление воды внутри бутылки газировки. Считайте, что внутри бутылки находится углекислый газ в газообразном состоянии и вода с растворённым в ней углекислым газом. Согласно закону Генри количество газа, растворённого в жидкости, над которой находится этот же газ, прямо пропорционально давлению этого газа $\nu = \alpha VP$, где V – объём жидкости, P – давление газа, $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-4}$ моль/(Па · м³) для углекислого газа, растворяемого в воде.

Атмосферное давление $P_0 = 10^5$ Па, комнатную температуру считайте равной $T = 300$ К, молярная масса углекислого газа $\mu_{CO_2} = 44$ г/моль.

В первой части работы оценивать погрешность не нужно.

Часть 2. (7 баллов). С помощью выданного вам оборудования проверьте справедливость закона Генри, получив три точки для зависимости количества растворённого газа от давления: одну - при атмосферном давлении, вторую - при давлении больше атмосферного и третью - при давлении меньше атмосферного. Подробно опишите Ваши действия и вычислите значение коэффициента α , сравнив его с данным в условии.

Оборудование: две бутылки с газированной водой, стаканчик, шприц объёмом 20 мл, затычка для шприца, салфетки для поддержания чистоты рабочего места.

Примечания:

- 1) Рекомендуем одну бутылку использовать для пробных экспериментов, а вторую для итогового. Не рекомендуем трясти бутылку перед тем, как её открывать.
- 2) Если вода находится в спокойном состоянии, то концентрация растворённого в ней газа приходит в равновесное состояние за относительно длительное время, но если воду перемешивать или взбалтывать, то равновесное состояние устанавливается гораздо быстрее.

Время выполнения задания 2 часа 20 минут

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике

Региональный этап

25 января 2020 г.

Задание 10.2. Сосчитай шарики. В прямоугольном непрозрачном запечатанном пакете из-под сока находится некоторое количество шариков (зёрен пшена). Определите их число.

Толщиной стенок пакета и его массой можно пренебречь. Считайте, что все шарики одинаковые как внутри прозрачной, так и внутри непрозрачной коробочек. Прозрачная коробочка выдана вам для качественного понимания процессов, происходящих внутри непрозрачной коробочки, её нельзя использовать в качестве оборудования, но вы можете ссылаться на качественные результаты экспериментов с прозрачной коробочкой. Также вы можете извлекать из прозрачной коробочки шарики и проводить с ними необходимые опыты.

ВАЖНО!!! Вскрывать непрозрачную коробочку и получать доступ к её содержимому запрещается! Также предложенный вами метод должен работать и для коробочек с жёсткими стенками, иначе он будет оценён в 0 баллов.

При написании отчёта уделите особое внимание описанию ваших действий, особенно тех, которые направлены на увеличение точности измерений и пояснениям как именно эти действия позволяют увеличить точность измерений.

Примечание: Объём шара равен $V_{\text{ш}} = \pi D^3 / 6$, где D – диаметр шарика.

Оборудование: прямоугольный непрозрачный запечатанный пакет из под сока, две линейки, канцелярская скрепка, прозрачная коробочка с шариками, лист миллиметровки формата А5.

Задание 10.1. Газировка.

Часть 1. (8 баллов). С помощью выданного вам оборудования определите давление воды внутри бутылки газировки. Считайте, что внутри бутылки находится углекислый газ в газообразном состоянии и вода с растворённым в ней углекислым газом. Согласно закону Генри количество газа, растворённого в жидкости, над которой находится этот же газ, прямо пропорционально давлению этого газа $\nu = \alpha VP$, где V – объём жидкости, P – давление газа, $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-4}$ моль/(Па · м³) для углекислого газа, растворяемого в воде.

Атмосферное давление $P_0 = 10^5$ Па, комнатную температуру считайте равной $T = 300$ К, молярная масса углекислого газа $\mu_{CO_2} = 44$ г/моль.

В первой части работы оценивать погрешность не нужно.

Часть 2. (7 баллов). С помощью выданного Вам оборудования проверьте справедливость закона Генри, получив три точки для зависимости количества растворённого газа от давления: одну - при атмосферном давлении, вторую - при давлении больше атмосферного и третью - при давлении меньше атмосферного. Подробно опишите Ваши действия и вычислите значение коэффициента α , сравнив его с данным в условии.

Оборудование: две бутылки с газированной водой, стаканчик, шприц объёмом 20 мл, затычка для шприца, салфетки для поддержания чистоты рабочего места.

Примечания:

- 1) Рекомендуем одну бутылку использовать для пробных экспериментов, а вторую для итогового. Не рекомендуем трясти бутылку перед тем, как её открывать.
- 2) Если вода находится в спокойном состоянии, то концентрация растворённого в ней газа приходит в равновесное состояние за относительно длительное время, но если воду перемешивать или взбалтывать, то равновесное состояние устанавливается гораздо быстрее.

Возможное решение

Часть 1. Откроем бутылку и аккуратно наберём из неё некоторое количество газировки в пустой шприц (около 5 мл). Сразу же заткнём кончик шприца затычкой. Поскольку бутылка была только что открыта, концентрация растворённого в ней углекислого газа соответствует давлению внутри бутылки (так как концентрация изменяется медленно).

Теперь будем трясти шприц, помогая растворённому газу перейти в газообразное состояние, при этом поршень шприца должен иметь возможность свободно перемещаться, обеспечивая равенство давления внутри шприца атмосферному.

Спустя некоторое время (около 10 минут) концентрация растворённого углекислого газа придёт в соответствие атмосферному давлению, а его газообразные излишки соберутся над водой.

Для воды в бутылке: $\nu_0 = \alpha V_B P_{\text{бут}}$, где V_B – объём воды, набранной в шприц, $P_{\text{бут}}$ – давление газа в бутылке, ν_0 – количества газа, растворённого в воде внутри бутылки.

Для воды в шприце после достижения равновесия: $\nu_0 - \nu_r = \alpha V_B P_0$, где ν_r – количество нерастворённого углекислого газа в шприце.

Запишем уравнение состояния идеального газа: $P_0 V_r = \nu_r RT$, где V_r – объём нерастворённого газа в шприце.

Из записанных выше уравнений получим: $\alpha V_B P_{\text{бут}} - \frac{P_0 V_r}{RT} = \alpha V_B P_0$, откуда

$$P_{\text{бут}} = P_0 \left(1 + \frac{V_r}{\alpha V_B RT} \right).$$

Измерения:

$V_B = 4$ мл, $V_r = 6$ мл

$$P_{\text{бут}} = P_0 \left(1 + \frac{V_r}{\alpha V_B RT} \right) = 10^5 \left(1 + \frac{6}{3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 8,31 \cdot 300} \right) = 2,7 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Часть 2. Для получения дополнительных точек зависимости количества растворённого газа от давления будем внутри шприца создавать другие давления. (Содержимое шприца осталось от первого эксперимента). Придерживая наконечник шприца, надавим на поршень с заметным усилием, и будем потряхивать шприц около 10 минут, добиваясь равновесной концентрации растворённого газа. Затем определим объём, занимаемый газом, продолжая также давить на поршень. Обозначим его V_r' . Теперь аккуратно отпустим поршень и измерим объём газа под поршнем сразу же после этого; обозначим его V_r .

Так как между замерами V_r' и V_r прошло мало времени, то концентрация растворённого в воде газа не успела измениться. Давление газа под сжатым поршнем можем получить из уравнения состояния идеального газа. $P = P_0 \frac{V_r}{V_r'}$.

Согласно закона Генри $\nu = \alpha V_B P$, тогда $\Delta \nu = \alpha V_B \Delta P$.

Для нашего опыта $\Delta P = P - P_0 = P_0 \left(\frac{V_r}{V_r'} - 1 \right)$, а $\Delta \nu = -\Delta \nu_r = -P_0 \frac{(V_r - V_{r0})}{RT}$, где V_{r0} – объём газа под поршнем при атмосферном давлении и при концентрации растворённого газа, соответствующей атмосферному давлению.

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

Подставив в закон Генри получим: $-P_0 \frac{(V_r - V_{r0})}{RT} = \alpha V_B P_0 \left(\frac{V_r}{V_r'} - 1 \right)$

$$\frac{V_r}{V_B} = \alpha RT \left(1 - \frac{V_r}{V_r'} \right) + V_{r0}$$

$$V_r = -\alpha RT V_B \frac{V_r}{V_r'} + const$$

Проведём аналогичный опыт, только теперь будем вытягивать поршень шприца, создавая под ним давление меньше атмосферного.

Построим график зависимости V_r от $\frac{V_r}{V_r'}$ для трёх точек (атмосферному давлению соответствует точка $(V_{r0}; 0)$)

V_r , мл	V_r' , мл	$\frac{V_r}{V_r'}$	ΔV_r , мл	$\Delta \frac{V_r}{V_r'}$
3,5	2,0	-0,75	0,5	0,69
6,0		0,00	0,5	0,10
8,0	16,0	0,50	0,5	0,05

Убедимся, что три точки лежат на прямой и определим угловой коэффициент этой прямой $k = -3,58$ мл.

Из полученной теоретической зависимости

$$\alpha = -\frac{k}{V_B RT} = \frac{3,58}{4 \cdot 8,31 \cdot 300} = 3,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3}$$

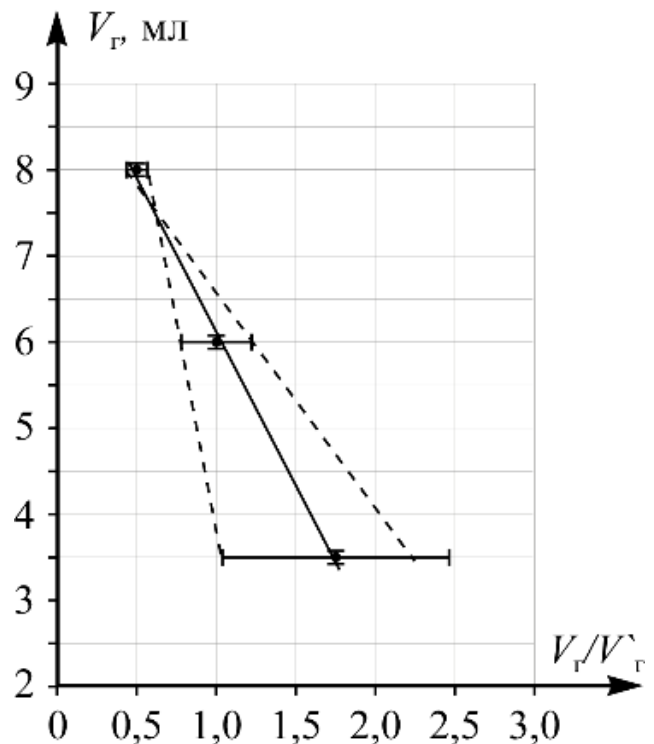
Оценим погрешность.

$$\Delta \frac{V_r}{V_r'} = \frac{V_r}{V_r'} \left(\frac{\Delta V_r}{V_r} + \frac{\Delta V_r'}{V_r'} \right)$$

Погрешность коэффициента k определим из графика по разнице между минимальным и максимальным угловыми коэффициентами.

$$\Delta k = \frac{8,2 - 2,7}{2} = 2,7 \text{ мл}$$

$$\varepsilon \alpha = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta V_B}{V_B} = 87\%$$



Учитывая теоретическую погрешность α , можно утверждать, что теоретическое значение соответствует экспериментальному.

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

Критерии оценивания

1	Предложена идея, позволяющая определить изменение количества растворённого газа при изменении давления. <i>(Если в предложенном методе часть воды из шприца удаляется, и невозможно проконтролировать сколько углекислого газа уходит вместе с водой, то за метод ставится максимум 1 балл)</i>	3 балла
2	Выполнены необходимые измерения, и они соответствуют реальности	1 балл
3	Контроль достижения равновесной концентрации. В работе явно указано, каким образом учащийся контролировал, что концентрация растворённого газа достигла равновесного состояния.	1 балл
4	Выведена теоретическая формула для определения давления внутри бутылки	1 балл
5	Для контрольного эксперимента была открыта новая бутылка воды и это явно указано в работе	1 балл
6	Получен корректный результат для давления внутри бутылки. <i>(Правильное значение и допустимы разброс зависят от оборудования на местах)</i>	1 балл
7	Предложена рабочая идея, позволяющая измерять количество растворённого газа при давлении большем, чем атмосферное	1,5 балла
8	Предложена рабочая идея, позволяющая измерять количество растворённого газа при давлении ниже атмосферного	1,5 балла
9	Выполнены необходимые измерения	1 балл
10	Построен график для проверки линейности зависимости (на графике подписаны оси, нанесена шкала, присутствуют экспериментальные точки и сглаживающая кривая)	1 балл
11	Получено значение α	1 балл
12	Оценена погрешность α и сделан вывод о соответствии теоретическому значению. <i>(Если нет оценки погрешности, то вывод не засчитывается.)</i>	1 балл

Требования к оборудованию:

1) Бутылки с газированной водой: две бутылки с минеральной **газированной** водой, объёмом 0,5-0,6 литра, не вскрытые. Выдаются участникам при комнатной температуре. Также важно обеспечить минимальное взбалтывание воды. В идеале следует расставить её на рабочие места с вечера и дать отстояться до начала тура. Хорошие результаты получаются с «Аква минерале», но подойдет и другая (лучше без вкусовых добавок).

Каждому участнику выдаются новые бутылки!!!

2) Шприц 20 мл с ценой деления 1 мл, **обязательно с резиновым поршнем**. Поршень внутри шприца должен перемещаться с небольшим трением. Для проверки наберите в шприц воздух примерно на половину объёма шприца, заткните отверстие и надавите на

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

поршень. После прекращения давления поршень должен возвращаться в исходное состояние. Также поршень не должен пропускать воздух, если давление внутри шприца больше или меньше атмосферного примерно в 2 раза. Шприц выдается без иглы. **Допускается повторное использование шприца, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**

3) Затычка на шприц. Затычка должна надежно надеваться на носик шприца и обеспечивать его герметичность при давлении внутри шприца отличающемся в 2 раза от атмосферного (как в большую, так и в меньшую сторону). Можно изготовить затычку из иглы, идущей в комплекте. Для этого нужно отломать металлическую иглолку от пластмассового основания и загерметизировать отверстие иглы. (Например, залить внутрь пластмассового наконечника небольшое количество влагостойкого клея). При этом наконечник должен иметь возможность плотно надеваться на носик шприца. **ВАЖНО!!!** Проверьте герметичность ваших наконечников при давлениях внутри шприца от $2P_{\text{атм}}$ до $0,5P_{\text{атм}}$, так как герметичность наконечника очень важна в этой задаче. **Допускается повторное использование затычки, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**

4) Стакан. Любой стакан, например, пластиковый на 200 г. **Допускается повторное использование стакана.**

5) Салфетки. 2-3 бумажные салфетки для поддержания чистоты на рабочем месте.

Задание 10.2. Сосчитай шарики.

В прямоугольной запечатанной непрозрачной коробочке находится некоторое количество шариков. Определите их количество.

Толщиной стенок непрозрачной коробочки и её массой можно пренебречь. Считайте, что все шарики одинаковые как внутри прозрачной, так и внутри непрозрачной коробочек. Прозрачная коробочка выдана вам для качественного понимания процессов, происходящих внутри непрозрачной коробочки, её нельзя использовать в качестве оборудования, но вы можете ссылаться на качественные результаты экспериментов с прозрачной коробочкой. Также вы можете извлекать из прозрачной коробочки шарики и проводить с ними необходимые опыты.

ВАЖНО!!! Вскрывать непрозрачную коробочку и получать доступ к её содержимому запрещается! Также предложенный вами метод должен работать и для коробочек с жёсткими стенками, иначе он будет оценён в 0 баллов.

При написании отчёта уделите особое внимание описанию ваших действий, особенно тех, которые направлены на увеличение точности измерений и пояснениям как именно эти действия позволяют увеличить точность измерений.

Примечание. Объём шара равен $V_{\text{ш}} = \pi D^3 / 6$, где D – диаметр шара.

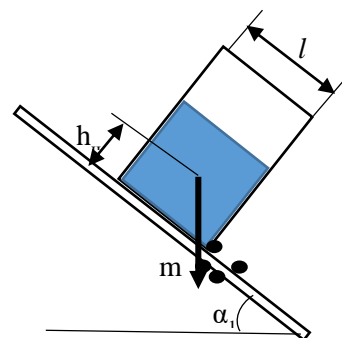
Оборудование: непрозрачная коробочка, две линейки, канцелярская скрепка, прозрачная коробочка, лист миллиметровки формата А5.

Возможное решение.

1. Проведём опыты с прозрачной коробочкой. Так как находящееся внутри неё пшено является сыпучим веществом, то можем заметить, что при наклоне коробочки до некоторого угла пшено сохраняет занимаемую им форму, а после превышения предельного угла пшено лавинообразно пересыпается. Заметим, что, если коробочку установить под некоторым углом и интенсивно постучать по боковым стенкам, создав вибрацию, то поверхность пшена оказывается параллельна горизонту.

Также заметим, что если стучать по коробочке вертикально, то поверхность пшена не всегда оказывается параллельна горизонту.

2. Расположим непрозрачную коробочку вертикально и постучим по её боковым стенкам, тогда пшено расположится так, что примет форму параллелепипеда. Установим коробочку на линейку и начнём плавно увеличивать угол наклона линейки к горизонту. Нам нужен угол, при котором коробочка начнёт переворачиваться. Мы сталкиваемся с проблемой, что коробочка начинает соскальзывать с линейки раньше, чем переворачивается, так как трения о линейку недостаточно. Для решения проблемы прицепим к линейке скрепку так, чтобы она образовала небольшой упор (на рисунке скрепка схематично обозначена четырьмя чёрными кружочками). Так как скрепка тонкая, то созданный ею упор не повлияет на моменты сил, но позволит коробочке не соскальзывать.



3. Повторим опыт с наклоном плоскости и убедимся, что коробочка начинает переворачиваться до того, как пшено внутри неё начинает пересыпаться. Это можно понять двумя способами:

- 1) по звуку (когда пшено пересыпается, это слышно);
- 2) использовать прозрачную коробочку и наклонить её на такой же угол.

Для угла, при котором начинается переворот коробочки, из уравнения моментов сил относительно правого нижнего угла коробочки получим:

$$h_{\text{цм}} = \frac{l}{2} \cdot \text{ctg}\alpha_1.$$

Тогда уровень пшена в коробочке составляет

$$h = 2h_{\text{цм}} = l \cdot \text{ctg}\alpha_1.$$

Измерим ширину l и глубину b коробочки.

$$l = 47 \text{ мм}, b = 39 \text{ мм}.$$

Угол α_1 определим через высоту конца линейки над столом H и длину линейки L .

Для повышения точности проведём опыты несколько раз. Очень важно увеличивать угол наклона плавно и медленно, не создавая вибрации и толчков, из-за которых коробка может начать раньше опрокидываться.

$$L = 25 \text{ см}.$$

№	H, см	$\sin\alpha_1$	$\text{ctg}\alpha_1$
1	11,1	0,430	2,10
2	10,6	0,411	2,22
3	10,8	0,419	2,17

$$\text{ctg}\alpha_{1\text{cp}} = 2,16$$

$$h = l \cdot \text{ctg}\alpha_{1\text{cp}} = 10,2 \text{ см}$$

4. Теперь мы знаем объём, занимаемый пшеном в коробке:

$$V = lbh = 4,7 \cdot 3,9 \cdot 10,2 = 187 \text{ см}^3.$$

5. Для того, чтобы узнать сколько шариков входит в этот объём, есть два варианта:

- 1) измерить объём, занимаемый пшеном в прозрачной коробочке, и посчитать количество шариков (крупинок) в ней;
- 2) определить диаметр шарика и рассчитать плотность упаковки.

6. Выберем второй путь. Для измерения диаметра шарика выложим 50 шариков в ряд и измерим длину ряда. Для формирования ряда можно согнуть миллиметровку и затем насыпать шарики в место сгиба.

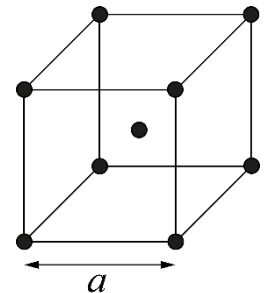
Длина ряда $L_p = 10,9$ см, количество шариков $N = 50$ шт, тогда диаметр шарика:

$$D = \frac{L_p}{N} = 2,18 \text{ мм}.$$

Объём одного шарика $V_{ш} = V_{ш} = \frac{\pi}{6} D^3 = 0,54 \text{ мм}^3$.

7. Можно рассмотреть разные варианты плотной упаковки.

1) Объёмно-центрированная кубическая решётка: элементарной ячейкой является куб, в каждой из вершин которого находится центр зерна, и ещё у одного центр совпадает с центром куба. Найдём плотность упаковки такой решётки: $k = \frac{V_0}{V_{я}}$, где $V_0 = NV_3$ – объём, занимаемый зёрнами, N – число зёрен, приходящихся на одну ячейку, $V_{я} = a^3$ – объём ячейки. Ребро куба a можно связать с диаметром зерна: $a\sqrt{3} = 2D$ (на большой диагонали куба укладывается два диаметра зерна). N подсчитаем таким образом: каждое из 8 зёрен, центры которых находятся в вершинах куба, принадлежит 8 соседним ячейкам, поэтому на каждую ячейку приходится по $1/8$ зерна, и ещё одно зерно находится в центре куба: $N = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2$.

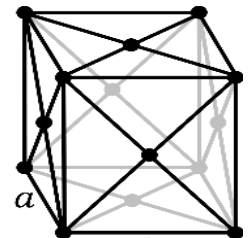


После подстановки $k = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} \approx 0,68$.

2) Гранецентрированная решётка. Атомы находятся в вершинах куба и на серединах всех граней. В этом случае:

$$a\sqrt{2} = 2D, N = 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4, k = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \approx 0,74.$$

3) Стандартная кубическая решётка. $a = D, N = 8 \cdot \frac{1}{8} = 1, k = \frac{\pi}{6} \approx 0,52$.



При решении задачи можно было взять любой из вариантов. Опыт, проведённый с заполнением пустот между зёрнами водой, показывает, что в реальности $k = 0,62$.

8. Примем $k = 0,6$. Объём занимаемый одним зёрнышком, равен $V_{ш}' = \frac{V_{ш}}{k} = 0,90 \text{ мм}^3$.

9. Тогда количество шариков равно $N_{ш} = \frac{V}{V_{ш}'} = 2 \cdot 10^5$.

10. Оценим погрешность: $\Delta \text{ctg} \alpha_{1 \text{cp}} = \frac{\sum | \text{ctg} \alpha_i - \text{ctg} \alpha_{\text{cp}} |}{3} = 0,04$; $\Delta D = \frac{2 \text{ мм}}{N} = 0,04 \text{ мм}$; $\Delta k = 0,1$

$$y \varepsilon N_{ш} = 3 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b} = 0,27; y \Delta N_{ш} = N_{ш} \cdot \varepsilon N_{ш} = 0,5 \cdot 10^5.$$

Окончательно:
$$N_{ш} = (2,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$$

Критерии оценивания:

1	Идея определения количества зёрен через центр масс коробочки	2 балла
2	Выбран и описан правильный способ обеспечения формы, занимаемой пшеном внутри коробочки	1 балл
3	Решена проблема соскальзывания коробочки с линейки	1 балл
4	Указано, что при угле опрокидывания коробочки зерно не пересыпается	1 балл
5	Выполнены измерения угла опрокидывания коробочки. 3 и более измерений – 3 балла, если одно измерение, то 1 балл	3 балла
6	Определён диаметр шарика с точностью не хуже 0,1 мм – 2 балла, если точность не хуже 0,4 мм, то 1 балл; иначе – 0 баллов	2 балла
7	Рассчитана плотность упаковки (разумное значение в интервале от 0,5 до 0,75)	2 балла
8	Получено количество шариков	2 балла
9	Оценка погрешности	1 балл

Примечание: Если вместо расчёта плотности упаковки подсчитывается количество шариков в некотором объёме, то за пункты 6 и 7 баллы ставятся следующим образом: если число посчитанных зёрен более 150, то полный балл, если равно или более 50, то по 1 баллу за каждый пункт, если менее 50, то 0 баллов.

Требования к оборудованию.

- 1) Непрозрачная коробочка с зерном – изготавливается из пакета сока. Высота пакета: 11-13 см, размеры основания пакета: 4-5 см, форма пакета – параллелепипед. Пакет аккуратно вскрывается сверху по шву, содержимое выливается, пакет промывается и высушивается. После этого внутрь засыпается пшено. Объём пшена должен составлять примерно $\frac{3}{4}$ от объёма пакета, и **количества зерна во всех пакетах должно быть одинаковым**. Затем пакет запечатывается и заклеивается с помощью скотча так, чтобы участники не могли получить доступ к его содержимому.
 - 2) Две деревянные линейки – длиной 25 см, в сечении – прямоугольные. Толщина линейки должна быть около 2 мм, чтобы, с одной стороны, она мало прогибалась под весом пакета, с другой стороны - на неё можно было надеть канцелярскую скрепку.
 - 3) Канцелярская скрепка – обычная, без пластикового покрытия, среднего размера. Скрепка должна надеваться на линейку и держаться на ней.
 - 4) Прозрачная коробочка с зерном – изготавливается из прозрачной коробочки из-под драже «тик-так» или аналогичной. Содержимое коробочки удаляется и внутрь неё насыпается то же самое пшено, примерно на половину объёма. У детей должна быть возможность доступа к пшену, насыпанному в коробочку (крышку заклеивать не нужно).
 - 5) Лист миллиметровки формата А5.
- ВАЖНО!!!** Если поставить упаковку из-под сока с пшеном на линейку (пшено должно занимать форму параллелепипеда) и начать её наклонять, то коробочка должна начать соскальзывать с линейки до того, как начнёт переворачиваться. При этом, если коробочку пытаться перевернуть на горизонтальной поверхности, то она должна начинать переворачиваться до того, как зерно внутри начнёт пересыпаться.

Задание 11.1. «Газировка (II)». Некоторые газы хорошо растворяются в жидкостях. Например, углекислый газ прекрасно растворяется в воде, что используется при приготовлении всем хорошо знакомой газировки. При постоянной температуре и не слишком больших давлениях количество газа, растворённого в жидкости, прямо пропорционально парциальному давлению этого газа над жидкостью (закон Генри)

$$v = \alpha Vp.$$

Здесь V – объём жидкости, p – парциальное давление газа, α – коэффициент, зависящий от температуры и измеряемый в моль/(Па·м³).

1. Убедитесь, что силы трения поршня о стенки корпуса шприца мала по сравнению с силой атмосферного давления на поршень. Опишите, как вы это сделали.
2. Определите давление газа в бутылке газированной воды
3. Определите величину α для углекислого газа и воды при комнатной температуре.

Считайте, что внутри бутылки находятся углекислый газ в газообразном состоянии и вода с растворённым в ней углекислым газом. При аккуратном открытии бутылки (не трясите её и не взбалтывайте перед этим!) за малый промежуток времени изменение концентрации газа в растворе незначительно.

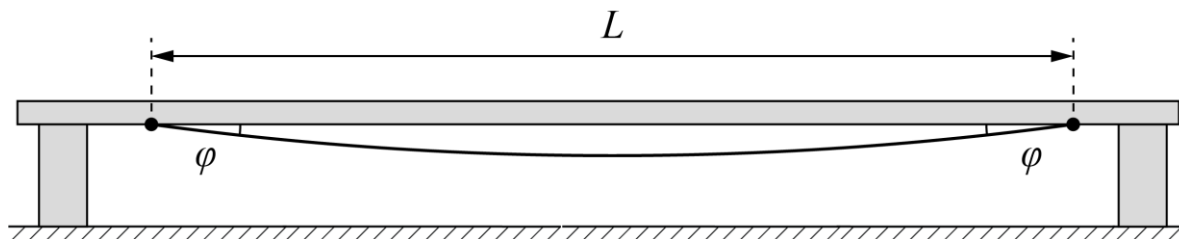
Оборудование: 1) две бутылки минеральной газированной воды; 2) шприц 20 мл; 3) заглушка на шприц; 4) одноразовый стакан 200 мл; 5) одноразовая пластиковая тарелка и салфетки для поддержания рабочего места в чистоте.

Примечания:

- 1) Рекомендуется одну бутылку использовать для пробных экспериментов, а вторую для итоговых. Не рекомендуется трясти бутылку перед тем, как её открывать.
- 2) Если вода находится в спокойном состоянии, то концентрация растворённого в ней газа приходит в равновесное состояние за относительно длительное время, но, если воду перемешивать или взбалтывать (в закрытой бутылке), равновесное состояние устанавливается гораздо быстрее (несколько минут).

Постарайтесь работать аккуратно, чтобы не облить себя и соседей, не залить водой рабочее место! Одноразовая посуда и салфетки выданы Вам для поддержания рабочего места в порядке.

Задание 11.2. Упругая лента. Изгиб подвешенной за концы резиновой ленты определяется равновесием упругих сил и сил тяжести. Для однородно растянутой ленты её натяжение $T = ES\Delta L/L$, где E модуль Юнга, S и L площадь сечения и длина ленты в нерастянутом виде, ΔL её удлинение. Закрепим концы ленты на одной горизонтали на расстоянии, равном её длине L в нерастянутом виде (рис.1). Провисшая под собственным весом лента образует с горизонталью некоторый угол φ , а середина ленты ниже этой горизонтали на некоторое расстояние h , называемое стрелой прогиба.



1. При помощи предложенного оборудования, измерьте стрелы прогиба h не менее чем для 10 значений длины ленты в **ненатянтом** виде L в диапазоне от 30 до 120 см. Результаты представьте в виде таблицы и графика $h(L)$
2. Используя полученные вами в п.1 экспериментальные результаты, считая, что $h = AL^n$, при использовании графической обработки определите значение n (n – не обязательно целое число). Сравните полученный результат с теоретической моделью в п.1. Оцените погрешность определения n .
3. При $\varphi \ll 1$ или $h \ll L$ ленту можно считать почти однородно растянутой по дуге окружности. Выведите в этом приближении теоретическое выражение для зависимости h от L , считая заданными: плотность резины ρ , модуль Юнга E , ускорение свободного падения g . В пределе малых углов можно использовать следующие приближения:

$$\sin \varphi \cong \varphi - \varphi^3/6; \cos \varphi \cong 1 - \varphi^2/2; \operatorname{tg} \varphi \cong \varphi + \varphi^3/3.$$

Сравните полученную формулу с результатом, полученным в п.2

4. Используя теоретическую зависимость, выведенную Вами в п.3 и результаты, полученные в п.1, определите значение модуля Юнга E . Плотность резины $\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$, ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Оцените погрешность определения E .

Оборудование: дюралевый уголок длиной 150 см; два бруска 15x10x3см как опоры; тонкая резиновая лента длиной 140 см и шириной 2-3 см (отрезать от резинового медицинского бинта); два зажима для фиксации ленты на уголке (из гвоздя и кольцевой «денежной» резинки, или короткая деревянная линейка и канцелярская клипса); мерная лента; миллиметровая бумага для построения графиков; скотч.

Задание 11.1. «Газировка (II)». Некоторые газы хорошо растворяются в жидкостях. Например, углекислый газ прекрасно растворяется в воде, что используется при приготовлении всем хорошо знакомой газировки. При постоянной температуре и не слишком больших давлениях количество газа, растворённого в жидкости, прямо пропорционально парциальному давлению этого газа над жидкостью (закон Генри)

$$v = \alpha V p.$$

Здесь V – объём жидкости, p – парциальное давление газа, α – коэффициент, зависящий от температуры и измеряемый в моль/(Па · м³).

1. Убедитесь, что сила трения поршня о стенки корпуса шприца мала по сравнению с силой атмосферного давления на поршень. Опишите, как вы это сделали.
2. Определите давление газа в бутылке газированной воды.
3. Определите величину α для углекислого газа и воды при комнатной температуре.

Считайте, что внутри бутылки находятся углекислый газ в газообразном состоянии и вода с растворённым в ней углекислым газом. При аккуратном открытии бутылки (не трясите её и не взбалтывайте перед этим!) за малый промежуток времени изменение концентрации газа в растворе незначительно.

Оборудование: 1) две бутылки минеральной газированной воды; 2) шприц 20 мл; 3) заглушка на шприц; 4) одноразовый стакан 200 мл; 5) одноразовая пластиковая тарелка и салфетки для поддержания рабочего места в чистоте.

Примечания:

- 1) Рекомендуется одну бутылку использовать для пробных экспериментов, а вторую для итоговых. Не рекомендуется трясти бутылку перед тем, как её открывать.
- 2) Если вода находится в спокойном состоянии, то концентрация растворённого в ней газа приходит в равновесное состояние за относительно длительное время, но, если воду перемешивать или взбалтывать (в закрытой бутылке), равновесное состояние устанавливается гораздо быстрее (несколько минут).

Постарайтесь работать аккуратно, чтобы не облить себя и соседей, не залить водой рабочее место! Одноразовая посуда и салфетки выданы Вам для поддержания рабочего места в порядке.

Возможное решение. Силу трения поршня о стенки можно считать несущественной по сравнению с силой давления газа на поршень. В этом можно убедиться, сжимая воздух в пустом шприце, закрытом заглушкой.

Откроем бутылку и аккуратно наберём из неё некоторое количество газировки в пустой шприц (около 5 мл). Сразу же заткнём кончик шприца заглушкой. Поскольку бутылка была только что открыта, то концентрация растворённого в ней углекислого газа соответствует давлению внутри бутылки.

Будем встряхивать шприц, чтобы ускорить переход системы в равновесное состояние. При этом поршень шприца должен иметь возможность свободно перемещаться, обеспечивая равенство давления внутри шприца атмосферному давлению p_0 . Газ, растворённый в воде, выделяется в газовую фазу при давлении, равном p_0 , и объём под поршнем увеличивается на величину объёма газа V_{Γ} (рис.1).

Спустя некоторое время (5 – 10 минут) установится равновесное состояние, при котором количество растворённого углекислого газа будет соответствовать p_0 , а давление углекислого газа под поршнем равно p_0 .

Для порции воды, набранной в шприц из бутылки, $\nu_0 = \alpha V_{\text{В}} p$, где $V_{\text{В}}$ – объём воды, набранной в шприц, ν_0 – количество растворённого в ней газа, p_0 – давление газа в бутылке. После установления равновесия в воде в растворённом виде

находится $\nu_{\text{в}} = \alpha V_{\text{В}} p_0$ моль газа, в газовой фазе $\nu_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT}$. Приравнивая $\nu_0 = \nu_{\text{в}} + \nu_{\Gamma}$, получаем:

$$\alpha V_{\text{В}} p = \alpha V_{\text{В}} p_0 + \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT},$$

откуда

$$\alpha = \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT V_{\text{В}} (p - p_0)}.$$

Повторим измерения несколько раз, в каждом случае аккуратно открывая и тут же закрывая бутылку.

Теперь определим давление углекислого газа в бутылке. Эту процедуру лучше проводить после предыдущих измерений с набором воды в шприц, чтобы минимизировать потери газа. Для этого выдвинем поршень шприца в положение 20 мл, установим заглушку и аккуратно поместим шприц внутрь бутылки с водой, сразу закрыв пробку бутылки. Встряхивая бутылку, периодически наблюдаем за положением поршня в шприце. Через некоторое время (5 – 10 минут) в бутылке установится равновесное дав-



ление p , а объём воздуха в шприце уменьшится от первоначального значения $V_1 = 20$ мл, до некоторого значения $V_2 = V_1 p / p_0$ (рис.2).



Отсюда $p = p_0 V_1 / V_2$.

Отметим, что при выполнении части работы, связанной с помещением шприца в бутылку, потери газа становятся заметными (по нашим данным давление при повторных измерениях уменьшается примерно на 5% при каждом последующем измерении), поэтому это измерение есть смысл с учётом ограниченного количества бутылок выполнять однократно.

Приведём результаты, полученные нами при использовании бутылки (0,5 л) минеральной воды «Aqua minerale»: $V_1 = (20,0 \pm 0,5)$ мл, $V_2 = (7,0 \pm 0,5)$ мл, $p = (2,85 \pm 0,25)$ атм.

Измерения объёма газа под поршнем с целью определения α : $T = 298\text{K}$,

№	V_B , мл	V_T , мл	α , моль / (Па · м ³)
1	6	10,5	$3,8 \cdot 10^{-4}$
2	6	10,5	$3,8 \cdot 10^{-4}$
3	7	11,0	$3,4 \cdot 10^{-4}$
4	5	8,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$
5	7,5	12,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$

Оценка систематической погрешности определения α :

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta V_T}{V_T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_B}{V_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(p-p_0)}{(p-p_0)}\right)^2} \approx 0,15.$$

Случайная погрешность для α по данным таблицы: $\Delta\alpha \approx 0,15 \cdot 10^{-4}$ моль / (Па · м³)

Окончательно $\alpha = (3,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ моль / (Па · м³).

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

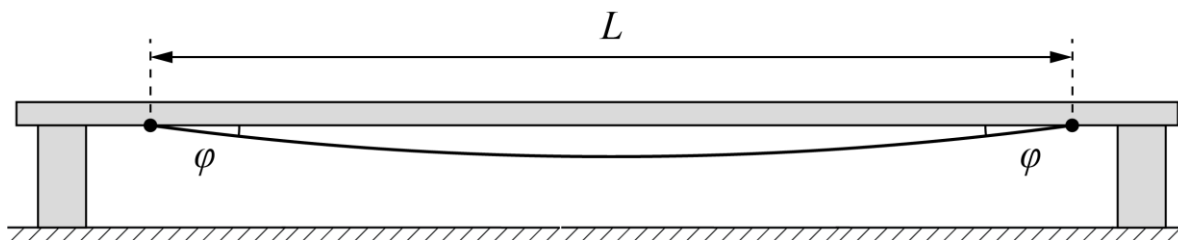
Критерии оценивания

1. Предложен и реализован метод проверки малости силы трения поршня о стенки шприца 1 балл
 2. Предложена идея метода определения давления газа в бутылке 2 балла
- Примечание: кроме авторского, возможны иные способы определения давления, связанные с анализом формул, линеаризацией зависимостей и т.д. Большинство таких методов не позволяют получить хорошую точность, и идея такого метода оценивается в 1 балл.*
3. Проведены эксперименты по определению давления газа по предложенному методу и получены численные результаты 1 балл
 4. Результат определения давления в бутылке отличается от результатов контрольных экспериментов, проведённых членами жюри, не более, чем
 - а) на 15% 2 балла
 - б) на 15-30% 1 балл
 5. Проведена разумная оценка систематической погрешности определения давления 0,5 балла
 6. Предложен и доведён до формул осуществимый метод определения коэффициента α 2 балла
 7. Проведено достаточное количество измерений для реализации п.6
 - а) не менее пяти 3 балла
 - б) не менее трёх 2 балла
 - в) одно измерение 1 балл
 8. При обработке экспериментальных данных по п.7 получено значение α в пределах
 - а) $(3,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$ моль/(Па · м³) 3 балла
 - б) $(3,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-4}$ моль/(Па · м³) 2 балла
 - в) $(3,5 \pm 2,0) \cdot 10^{-4}$ моль/(Па · м³) 1 балл
 9. Проведена разумная оценка погрешности определения α 0,5 балла

Требования к оборудованию:

- 1) Бутылки с газированной водой: две бутылки с минеральной **газированной** водой, объёмом 0,5 литра, не вскрытые. Выдаются участникам при комнатной температуре. Также важно обеспечить минимальное взбалтывание воды. В идеале надо расставить её на рабочих местах с вечера и дать отстояться до начала тура. Хорошие результаты получаются с «Аква минерале», но подойдёт и любая другая вода без сахара. Необходимо проверить, что размеры пустой бутылки позволяют поместить внутрь шприц с полностью выдвинутым поршнем. **Этикетки с бутылок необходимо удалить!!! Каждому участнику выдаются новые бутылки!!!**
- 2) Шприц 20 мл с ценой деления 1 мл, **обязательно с резиновым поршнем**. Поршень внутри шприца должен перемещаться с небольшим трением. Для проверки наберите в шприц воздух примерно на половину объёма шприца, заткните отверстие и надавите на поршень. После прекращения давления поршень должен возвращаться в исходное состояние. Также поршень не должен пропускать воздух, если давление внутри шприца больше или меньше атмосферного примерно в 3 раза. Шприц выдаётся без иглы. На корпусе шприца должны быть нанесены хорошо читающиеся деления. **ВАЖНО!!!** Упоры для пальцев на корпусе шприца необходимо аккуратно обрезать острым ножом так, чтобы шприц с выдвинутым поршнем (без иглы!) полностью помещался внутрь пустой бутылки. **Допускается повторное использование шприца, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**
- 3) Заглушка на шприц. Изготавливается из иглы, идущей в комплекте. Нужно отломить металлическую иголку от пластмассового основания (канюли) и загерметизировать канюлю. Для герметизации можно затолкать и уплотнить с помощью зубочистки или спички небольшое количество пластилина или жевательной резинки. Подготовленная таким образом канюля должна плотно надеваться на носик шприца. **ВАЖНО!!!** Проверьте герметичность заглушки при давлениях внутри шприца от $3P_{\text{атм}}$, так как герметичность принципиальна в этой задаче. **Допускается повторное использование затычки, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**
- 4) Одноразовые стакан, нож и тарелка. Подойдут любые из наборов пластмассовой посуды, продающихся в магазинах. Однако, тарелки лучше выбрать большого размера. Стакан и тарелка используются для поддержания рабочего места в чистоте, нож – для удаления этикетки с бутылок.
- 5) Салфетки. Лучше использовать бумажные салфетки в рулоне. Каждому участнику выдаётся 3-4 салфетки для поддержания рабочего места в чистоте. Необходимо иметь достаточный запас салфеток у дежурных по аудитории (примерно, рулон на 10 человек).

Задание 11.2. Упругая лента. Изгиб подвешенной за концы резиновой ленты определяется при равновесии упругих сил и силы тяжести. Для растянутой ленты, линейную плотность которой можно считать постоянной, её натяжение $T = ES\Delta L/L$, где E модуль Юнга, S и L площадь сечения и длина ленты в нерастянутом виде, ΔL её удлинение. Закрепим концы ленты на одной горизонтали на расстоянии, равном её длине L в нерастянутом виде (рис.1). Провисшая под собственным весом лента образует с горизонталью некоторый угол φ , а середина ленты ниже этой горизонтали на некоторое расстояние h , называемое стрелой прогиба.



ЗАДАНИЕ

1. При помощи предложенного оборудования, измерьте стрелы прогиба h не менее чем для 10 значений длины ленты в **ненатянтом виде** L в диапазоне от 30 до 120 см. Результаты представьте в виде таблицы и графика $h(L)$.
2. Используя полученные вами в п.1 экспериментальные результаты, считая, что $h = A \cdot L^n$, при использовании графической обработки, определите значение n (n – не обязательно целое число). Сравните полученный результат с теоретической моделью по п.1. Оцените погрешность определения n .
3. При $\varphi \ll 1$ или $h \ll L$ можно считать, что лента имеет постоянную линейную плотность и растянута по дуге окружности. Выведите в этом приближении теоретическое выражение для зависимости h от L , считая заданными: плотность резины ρ , модуль Юнга E , ускорение свободного падения g . В пределе малых углов можно использовать следующие приближения:

$$\sin \varphi \cong \varphi - \varphi^3/6; \cos \varphi \cong 1 - \varphi^2/2; \operatorname{tg} \varphi \cong \varphi + \varphi^3/3.$$

Сравните полученную формулу с результатом, полученным в п.2

4. Используя теоретическую зависимость, выведенную Вами в п.3 и результаты, полученные в п.1, определите значение модуля Юнга. Плотность резины $\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$, ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Оцените погрешность определения E .

Оборудование: дюралевый уголок длиной 120 см; два бруска 15x10x3 см как опоры; тонкая резиновая лента длиной 120 см и шириной 2-3 см (отрезать от резинового медицинского бинта); два зажима для фиксации ленты на уголке (из гвоздя и кольцевой «денежной» резинки, или короткая деревянная линейка и канцелярская клипса); мерная лента; миллиметровая бумага для построения графиков; скотч.

Возможное решение. Под длиной резиновой ленты понимается длина её участка между фиксирующими зажимами. С помощью мерной ленты размечается уголок и резиновая лента, положенная сверху на горизонтальную или даже наклонную поверхность уголка. После фиксации зажимами уголок поворачивают так, чтобы резиновая лента могла свободно провисать от горизонтальной поверхности. К другой стороне уголка (вертикальной) прикрепляем скотчем миллиметровую бумагу, и для указанных значений L измеряем стрелу прогиба.

Результаты измерений вносим в таблицу, с дополнительными столбцами для дальнейшей обработки.

2. Строим график зависимости $\ln h$ ($\ln L$). По угловому коэффициенту определяем величину n . С учётом разброса экспериментальных данных с помощью этого же графика оцениваем погрешность определения n .

3. При $\varphi \ll 1$ или $h \ll L$ можно считать, что лента имеет постоянную линейную плотность и растянута по дуге окружности некоторого радиуса R . Раз горизонтальная проекция натяжения неизменна, то $T \cos \varphi = T_0$, где T_0 натяжение в нижней точке, а T натяжение вблизи точки подвеса. Отсюда для малого φ имеем $T \cong T_0$.

Из равновесия по вертикали $2T \sin \varphi = \rho g L S$, а тогда $T \cong \rho g L S / 2 \varphi$.

Относительное удлинение $\Delta L / L = 2R(\varphi - \sin \varphi) / 2R \sin \varphi \cong \varphi^2 / 6$.

После подстановок из $T = ES \Delta L / L$ находим для модуля Юнга $E = 3 \rho g L / \varphi^3$.

Так как $h = R(1 - \cos \varphi)$, а $L = 2R \sin \varphi$, то $\varphi = 4h / L$, а $E = 3 \rho g L^4 / 64 h^3$.

Использованы приближения: $\sin \varphi \cong \varphi - \varphi^3 / 6$; $\cos \varphi \cong 1 - \varphi^2 / 2$; $\operatorname{tg} \varphi \cong \varphi + \varphi^3 / 3$.

4. Для определения модуля Юнга можно построить график зависимости $h(L^{4/3})$ и по наклону графика определить E . Другая возможность решения – расчёт по полученной формуле зависимости $h(L)$ значений E для разных L с последующим усреднением.

Критерии оценивания

1. Наличие таблицы экспериментальных результатов по п.1 (количество точек не менее 10) – (по 0,4 балла за точку. Точки, отличающиеся друг от друга по L менее, чем на 5 см, считаются за одну!) 4 балла.

Примечание. Экспериментальные результаты, значимо (более чем на 15%) отличающиеся от контрольных значений, полученных жюри при тестировании оборудования, не учитываются!

Максимальная оценка за пункт – 4 балла.

2. Построен график $h(L)$. При этом график хорошо читается, подписаны координатные оси, выбран удобный масштаб и т.д. При выполнении указанных требований 1 балл.

При недостатках в построении графика оценка за график может быть снижена на 0,5 балла.

Максимальная оценка за пункт – 1 балл

3. Определено значение n (п.2) при **обязательном** построении графика в логарифмическом масштабе. Если полученное значение n попадает в диапазон значений от 1,15 до 1,5, ставится 2,5 балла. В диапазоне от 1,05 до 1,6 ставится 1,5 балла. За результат в диапазоне от 0,9 до 1,75 ставится 0,5 балла.

Проведена оценка погрешности определения n с помощью графика в логарифмических координатах – 0,5 балла.

Максимальная оценка за пункт – 3 балла

4. При выводе теоретической зависимости $h(L)$ обоснованно получено выражение

$$h = \left(\frac{3\rho g L^4}{64E} \right)^{1/3}. \quad 3 \text{ балла.}$$

Максимальная оценка за пункт – 3 балла.

5. При обработке экспериментальных результатов (п.1) с использованием теоретической зависимости $h = \left(\frac{3\rho g L^4}{64E} \right)^{1/3}$ определены значения модуля Юнга резины E .

5.1 - использован график в координатах $h(L^{4/3})$ или рассчитаны значения модуля Юнга по полученной в п.3 формуле $h(L)$, при этом определено среднее значение для различных L – 1,5 балла

5.2 Полученное значение модуля Юнга попадает в диапазон

3,0 - 4,0 МПа	2 балла
2,5 - 4,5 МПа	1,5 балла
2,0 - 5,0 МПа	1 балл
1,0 - 6,0 МПа	0,5 балла

Примечание. модули Юнга резиновой ленты могут отличаться в зависимости от региона и т.д. В этом случае жюри вправе скорректировать диапазоны оценивания модуля Юнга по своим данным, полученным при тестировании оборудования.

5.3 – оценка погрешности определения модуля Юнга – 0,5 балла.

Максимальная оценка за пункт – 4 балла