Олимпиадный физический эксперимент в школьный практикум

Семинар «КПК-2020»
Физтех, 21.06.2020 г.

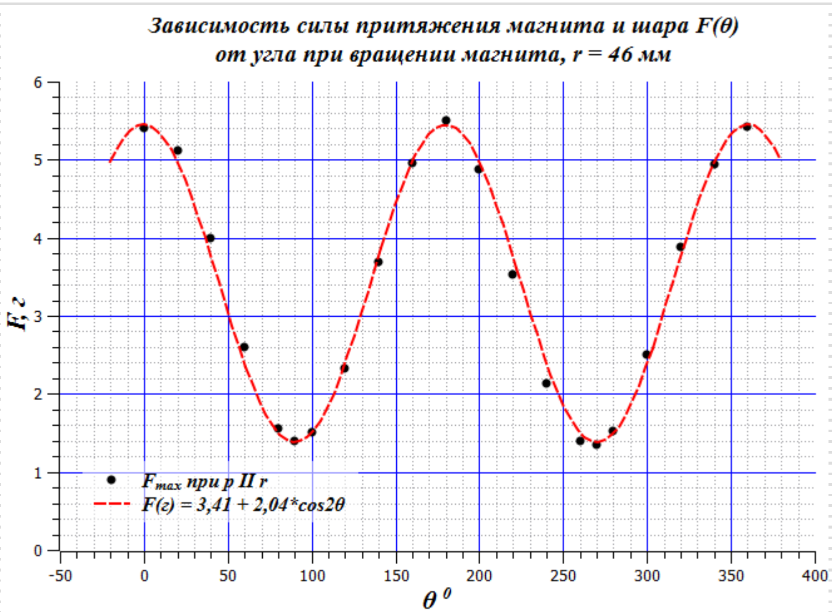
Алексей Гуденко
к.ф.-м.н.,
доцент кафедры общей физики МФТИ

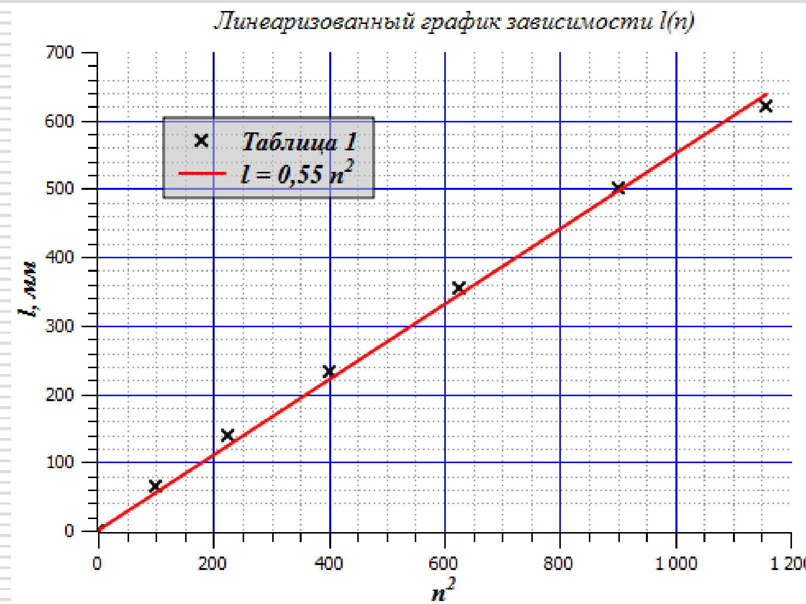
Все задачи в предлагаемой презентации - авторские

Полезные сайты

- **Олимпиадная школа МФТИ, курс «Экспериментальная физика»: http://edu-homelab.ru**
- **Международная олимпиада по экспериментальной физике (IEPhO): http://iepho.com**
- **Информационный сайт Всероссийской олимпиады по физике: http://4ipho.ru**

Обработка результатов, графики





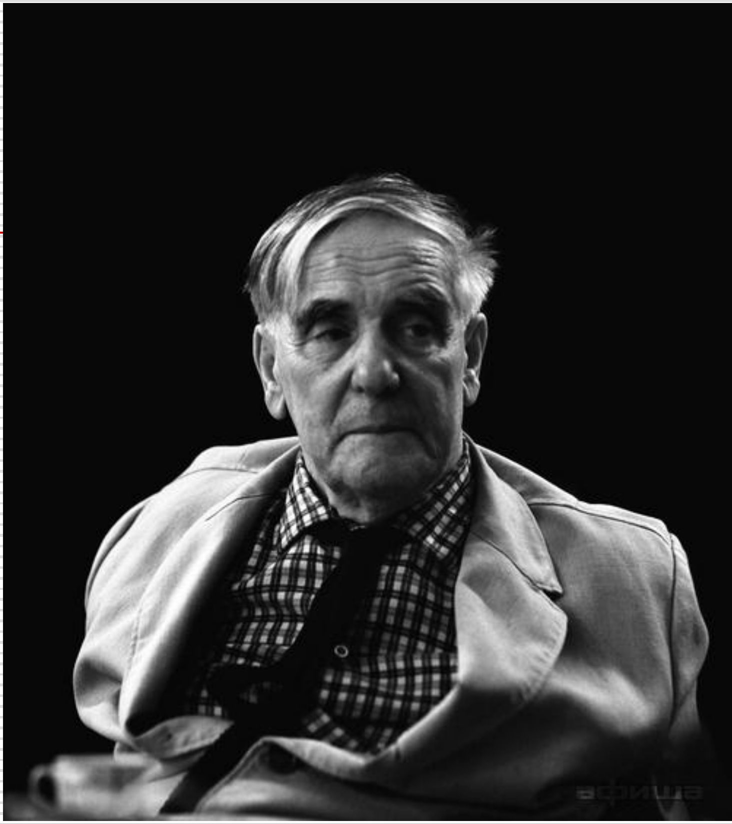
- Все графики оформлены с помощью программы SciDavis http://scidavis.sourceforge.net

Наши планы

- Неваляшка
- Лестница
- Лягушка
- Слинки (Slinky)
- Удельное сопротивление воздуха
- Конденсатор с утечкой
- Физика желеобразных веществ
- Упругие свойства резины: Гук или не Гук
- Определение мощности взрыва воздушного шарика в тротиловом эквиваленте
- Воздушный шарик. Сила сопротивления
- Коэффициент диффузии гелия через резиновую оболочку шарика
- Красивые опыты, демонстрации с постоянными магнитами

Петр Леонидович Капица – основатель Физтеха

- *На дне стакана, стоящего на весах, сидит муха. В какой момент весы начнут чувствовать, что муха улетела?*
- *Какие движения должен совершать человек, чтобы вращать обруч?*
- *С какой скоростью должен бежать по воде человек, чтобы не тонуть?*
- *Почему жидкий азот (-195 ^{0}С) можно лить на руку, не боясь «ожога»?*
- *Какого цвета будет казаться красная жидкость, если сосуд с ней поместить в сосуд с синей жидкостью?*



Петр Леонидович Капица
(1894–1984)
Выдающийся российский физик, академик. Открыл сверхтекучесть жидкого гелия. Основатель Физтеха, системы Физтеха.
Лауреат Нобелевской премии по физике 1978 года

Узел Капицы

Неваляшка, IEPhO-4 (8, 9 классы)

Оборудование

- Неваляшка
- деревянная линейка 50 см
- кусок пластилина
- карандаш (ручка)
- лист бумаги

Задание

- С помощью имеющегося оборудования определите как можно точнее высоту центра тяжести *h* неваляшки относительно уровня стола, на котором она расположена

- *Указание:*

Основание неваляшки считать сферическим, неровностями его поверхности пренебречь. Массу подвижных частей колокольчика внутри неваляшки считать пренебрежимо малой

Решение. Шаг № 1

- По длине окружности $C = 283$ мм (Неваляшку оборачиваем бумагой) определяем радиус сферического основания Неваляшки:
  $R = C/2\pi = 45$ мм.

МФТИ

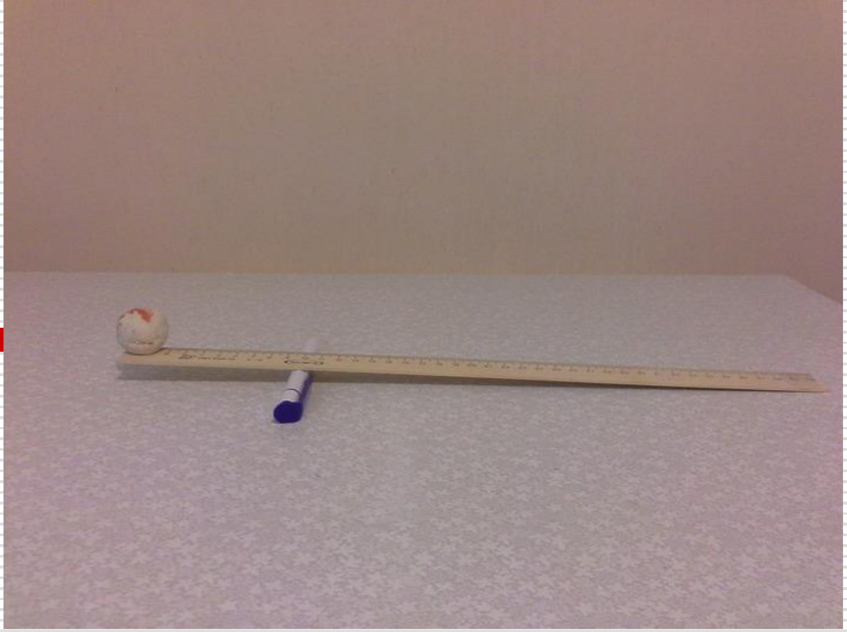
Шаг № 2

- Подбираем кусок пластилина такой массы m, чтобы ось Неваляшки расположилась горизонтально.
- Из условия равновесия относительно точки опоры (точки касания сферы со столом) получаем:
  $mgb = Mg\Delta\ell$, где $b = 100$ мм – рычаг куска пластилина, а $Mg\Delta\ell$ - момент силы тяжести Неваляшки ($\Delta\ell$ - расстояние от центра сферического основания Неваляшки вдоль её оси до центра масс Неваляшки) →
  $\Delta\ell = (m/M)\, b$
  Цель дальнейших действий - найти отношение m/M.

Шаг № 3

- Уравновешиваем Неваляшку на «рычажных весах», изготовленных из линейки (рычаг) и карандаша (опора). Из условия равновесия получаем ($m_л$ – масса линейки):
  $Mg\ell_1 = mg\ell_2 + m_лg\ell_3$
  Делаем необходимые измерения:
  ℓ_1 = 49 мм – рычаг Неваляшки;
  ℓ_2 = 341 мм – рычаг пластилина;
  ℓ_3 = 146 мм – рычаг линейки (расстояние от точки опоры до середины линейки).
  Из уравнения моментов:
  $m/M = \ell_1/(\ell_2 + m_л/m\ \ell_3)$

Шаг № 4



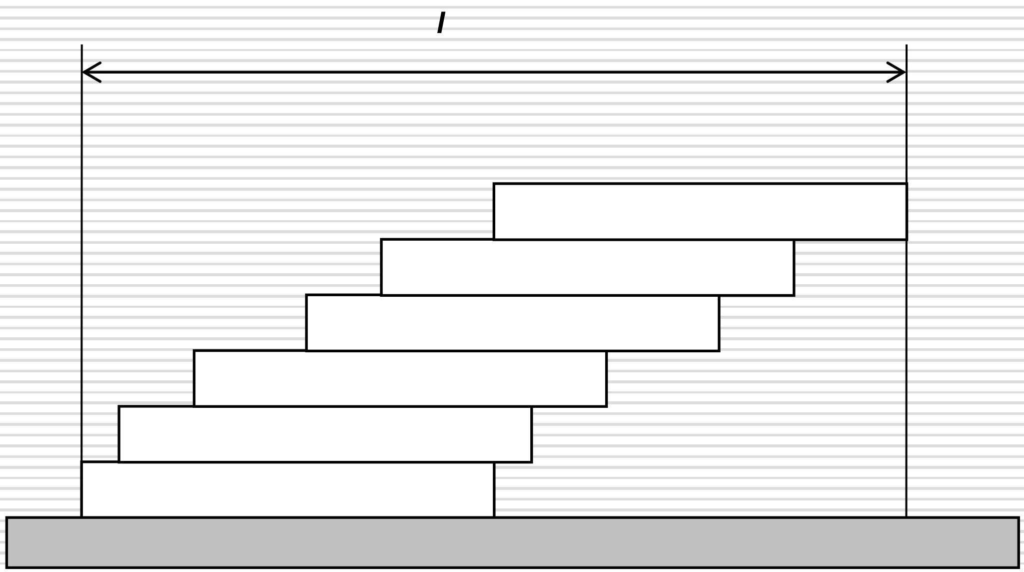
- Отношение масс линейки и пластилина находим, уравновесив пластилин линейкой. Из уравнения моментов:
  $m_л/m = \ell_m/\ell_л$, где ℓ_m = 95 мм – рычаг пластилина;
  $\ell_л$ = 100 мм – рычаг линейки.
  Подставляя численные значения, находим:
  $m_л/m = 0{,}95$.
  Отношение масс пластилина и Неваляшки (см. Шаг № 3):
  $m/M = \ell_1/(\ell_2 + m_л/m\ \ell_3) = 49/(341 + 0{,}95 \cdot 146) = 0{,}102$

  Примечание:
  точные измерения на весах дают следующие значения масс:
  масса Неваляшки M = 148 г, масса пластилина: m = 15,26 г → m/M = 0,103 (!))

Заключительный шаг (без картинки)

- Центр масс Неваляшки расположен на $\Delta\ell = (m/M)\ b = 0{,}102*100 = 10$ мм ниже центра сферы основания, т.е. на высоте:
  $h = R - \Delta\ell = 35$ мм над уровнем стола

Лестница из линеек, IEPhO-4 (9, 10 классы)



Оборудование

12 деревянных линеек длиной $\ell_0 = 21$ см каждая, линейка 50 см

Задание

- Постройте ступенчатую лестницу максимальной (по горизонтали) длины из n = 2, 3, 4, …12 линеек. Для каждого n измерьте длину получившейся у вас лестницы и результаты измерений занесите в таблицу, как в абсолютных, так и в относительных единицах.
- Получите теоретическую зависимость максимальной длины лестницы от числа линеек *n*.
- Сравните теоретические значения с соответствующими экспериментальными значениями.
- Оцените максимальную длину лестницы, которую можно составить из линеек всех участников, выполняющих эту работу. Считайте, что работу пишет 20 участников.

Строим лестницы

Теория:
$\Delta_k = \ell_0/2k$; $\ell(n) = \ell_0 + \frac{1}{2}\ell_0 \sum 1/k$

- **центр масс стопки, лежащей над какой-то линейкой, приходится точно на её опорный край →**
- смещение k-ой сверху линейки относительно *(k+ 1)*-ой должно удовлетворять условию:

  $\mathbf{mg(\ell_0/2 - \Delta_k) = (\mathit{k} - \mathit{1})mg\Delta_k} \rightarrow$

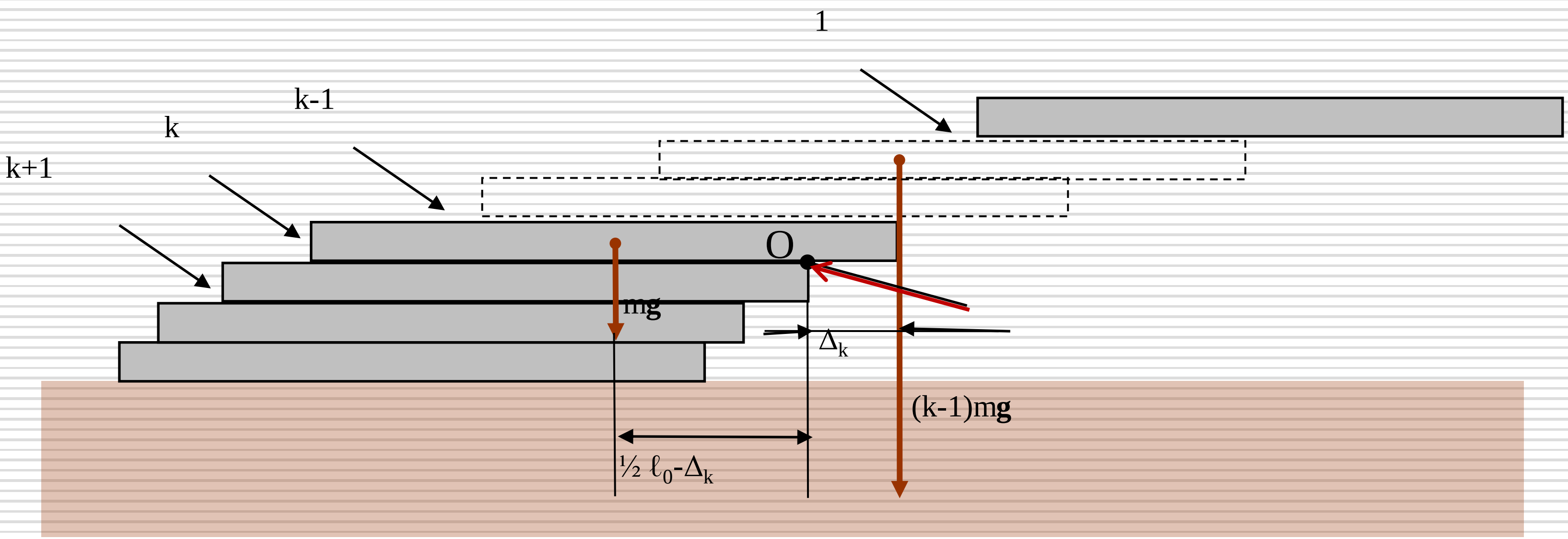
  ширина k-ой ступеньки: $\mathbf{\Delta_k = \ell_0/2k}$

- Полная длина лестницы складывается из длины линейки ℓ_0 и сумме ширин всех её ступенек:

  $\ell = \ell_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \ldots$

- Общая длина лестницы:

  $\ell(n) = \ell_0 + \frac{1}{2}\ell_0[1 + \frac{1}{2} + 1/3 + \frac{1}{4} + \ldots + 1/(n-1)]$


1
k-1
k
k+1
O
mg
Δk
(k-1)mg
½ ℓ0-Δk

Наши линейки: ℓ_0=210 мм

$\Delta_k=\ell_0/2k$

- $\Delta_1=0{,}5\ell_0/1$ = 105 мм
- $\Delta_2=0{,}5\ell_0/2$ = 52,5 мм
- Δ_3 $=0{,}5\ell_0/3$ = 35 мм
- $\Delta_4=0{,}5\ell_0/4$ = 26,25 мм
- $\Delta_5=0{,}5\ell_0/5$ = 21 мм
- $\Delta_6=0{,}5\ell_0/6$ = 17,5 мм
- $\Delta_7=0{,}5\ell_0/7$ = 15 мм
- $\Delta_8=0{,}5\ell_0/8$ = 13 мм
- $\Delta_9=0{,}5\ell_0/9$ = 11,7 мм
- $\Delta_{10}=0{,}5\ell_0/10$ = 10,5 мм
- $\Delta_{11}=0{,}5\ell_0/11$ = 9,5 мм

12 линеек, 240 линеек

- $N = 12$
  $\ell_T(8) \approx \ell = \ell_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \ldots.\ \Delta_{10} + \Delta_{11} \approx$
  $2{,}51\ell_0 = 52{,}6$ см

- $N = 240$
  $\sum 1/k \approx \int dz/z \approx \ell n\ n$

$L \approx \ell_0 + 0{,}5\ell_0(1+1/2 + 1/3 + \ldots 1/11 + \ell n(N/12)) =$
$\ell_0 + 0{,}5\ell_0(3{,}0 + \ell n 20) \approx 4{,}0\ \ell_0 \approx 84$ см

Тренажёр

- Цель работы – исследование свойств силового тренажёра; экспериментальная проверка «золотого» правила механики, «самовзвешивание» с помощью тренажёра
- Оборудование: силовой тренажёр, весы типа «безмен», груз (1-2 пластиковые бутылки (1,5 – 2л) с водой), пакет с ручками, верёвка ($\ell \sim 0{,}5$ м), рулетка, ножницы, весы напольные (для контрольного измерения собственного веса)

Схема установки

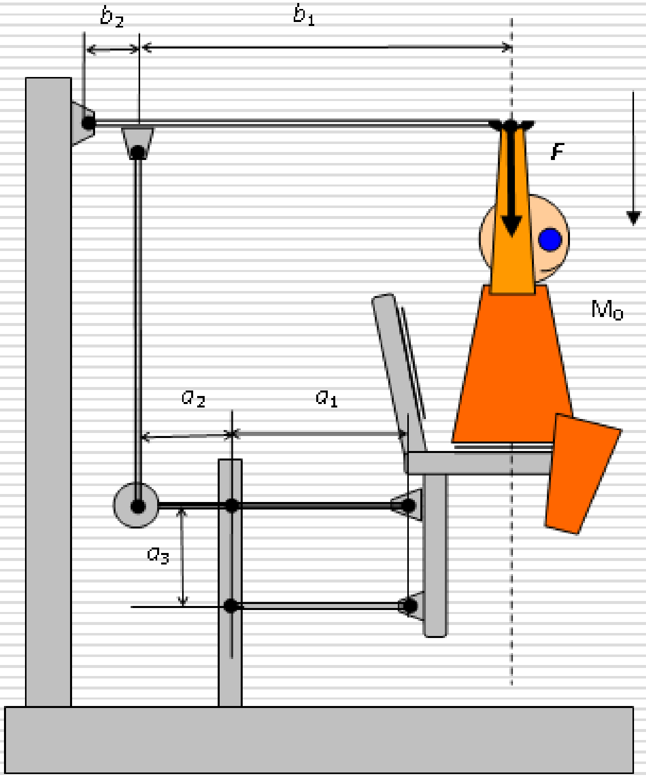


Рис.1

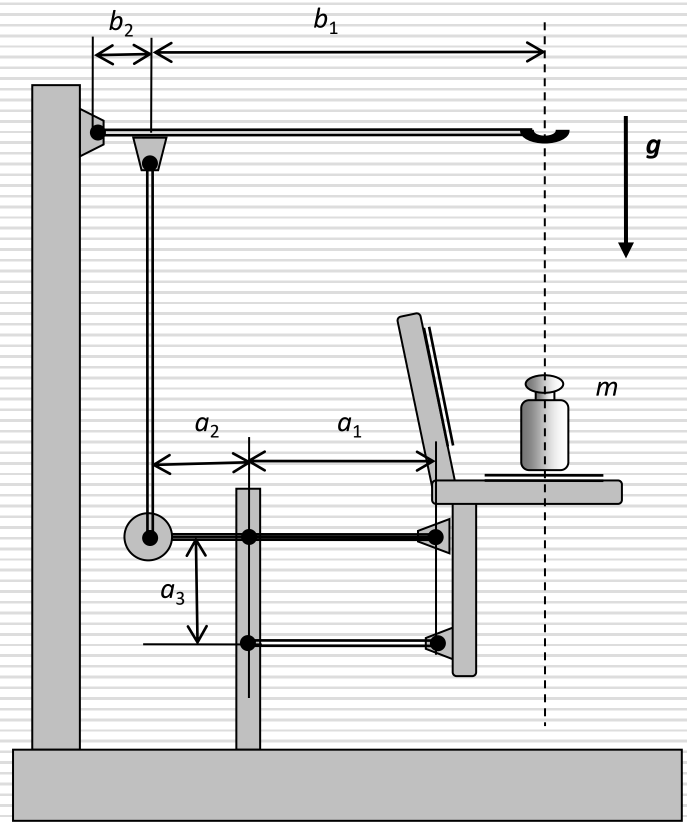
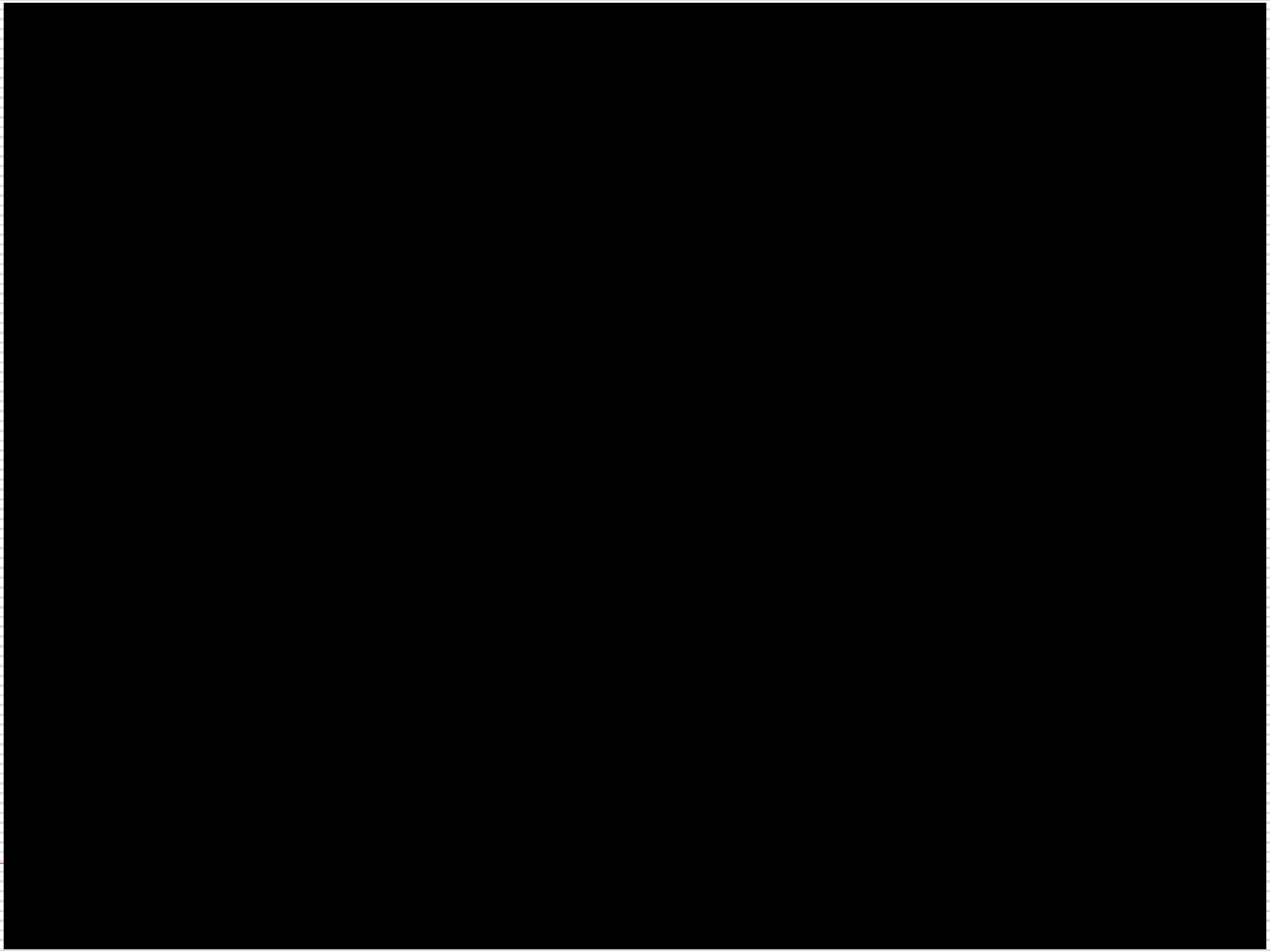


Рис.2

Установка в действии



Задание

- Определите массу груза m, необходимую для уравновешивания тренажёра без спортсмена (рис 2). В равновесии верхний рычаг горизонтален.
- Выясните, зависит ли масса m уравновешивающего груза от его положения на кресле.
- Сядьте на кресло и поднимите-опустите себя несколько раз, не касаясь земли ногами.
- Подцепите «безмен» к верхнему рычагу. С помощью «безмена» измерьте силу F, необходимую для того, чтобы, сидя в кресле, приподнять себя и удерживать верхний рычаг в горизонтальном положении (рис. 1). Выясните, зависит значение силы F от вашего положения на кресле. При измерениях на касайтесь ногами земли.
- Измерьте длины всех рычагов, которые могут потребоваться при расчёте выигрыша в силе.
- Используя значения измеренных величин (длин рычагов, массы m, силы F), определите свой собственный вес. Оцените погрешность измерений.
- Сравните найденное значение веса с «истинным» собственным весом, определённым с помощью напольных весов.

Указания к решению: «Теория» тренажёра, результаты измерений

- Значение массы уравновешивающего груза m и показания весов F при «самоподъёме» **не зависят от положения груза или спортсмена на кресле**. Это следует из 1) «золотого» правила механики и 2) особенностями конструкции системы рычагов и шарниров, обеспечивающих **плоскопараллельное перемещение кресла**.
- «Рабочая формула» для определения собственного веса по показаниям безмена (F/g):
  M (кГ) = (F/g)(1 + ϰ) + m,
  где $ϰ = a_2 (b_1 + b_2)/(a_1 b_2)$
- Результаты измерений на «авторском» тренажёре:
  Длины рычагов (рис.1-2):
  $\boldsymbol{a_1}$ **= 27,5 см;** $\boldsymbol{a_2}$ **= 13,0 см;** $\boldsymbol{a_3}$ **= 17,5 см;** $\boldsymbol{b_1}$ **= 73,5 см;** $\boldsymbol{b_2}$ **= 8,5 см**.
  Масса уравновешивающего груза: **m = 3,7 кг**
  Показание «безмена»: **F/g = 14,8 кг**
  Масса автора:
  M = (F/g)(1 + ϰ) + m ≈ 86 кг ($ϰ = a_2 (b_1 + b_2)/(a_1 b_2) \approx 4,56$)

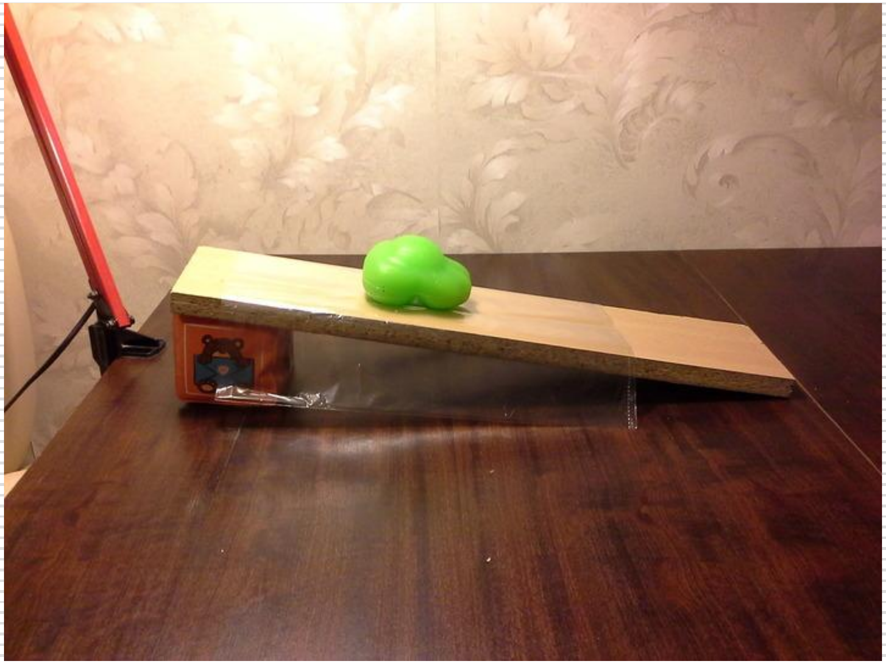
Лягушка IEPhO-4
(8, 9 классы)

- **Оборудование:**
  кистевой эспандер из мягкой резины («лягушка»), полиэтилен, дощечка, линейка

- **Задание**:
  определите коэффициент трения полиэтилена и «лягушки» о поверхность дощечки

Решение:
коэффициент трения полиэтилена $\mu_п$

- Кладём «Лягушку» на полиэтилен и по критическому углу определяем коэффициент трения:
  $\mu_п = tg\alpha_{крит} = 0,32$



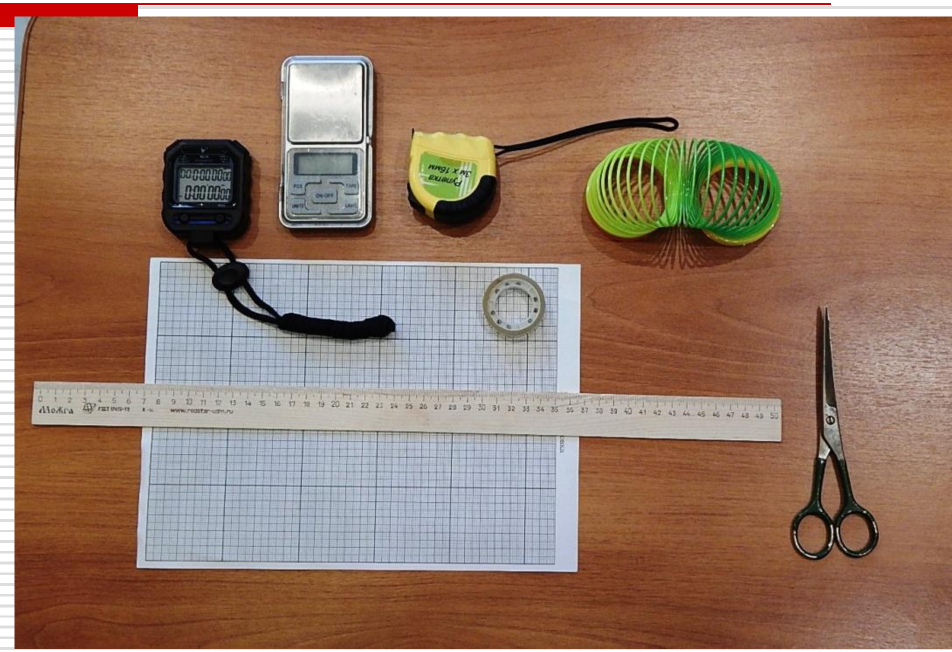
Решение: коэффициент трения «лягушки» $\mu_л$

- Переворачиваем «установку» и по крит. углу находим коэффициент трения дощечки по «лягушке»:
  $\mu_л = tg63^0 \approx 2$

Изучение упругих свойств пластиковой пружины Слинки (Slinky)

- ***Цель работы:*** изучение упругих свойств пластиковой пружины Слинки; исследование колебаний массивной пружины.

- ***Оборудование:*** Пластиковая пружина Слинки (Slinky), штатив с лапкой, линейка, мерная лента, секундомер, весы, скотч.



Задание (статика)

1. Снимите зависимость $\ell(n)$ длины ℓ пружины от числа n свободно свисающих витков. Для этого закрепите в штативе деревянную линейку. Разделите линейкой пружину так, чтобы под линейкой оказалось n витков. Для каждого значения n измерьте общую длину свободно свисающих витков. Измерения проведите для $n \geq 10$. Результаты измерений занесите в Таблицу №1.
2. Получите теоретическую зависимость $\ell(n)$, выразив ℓ через массу m_0 и жёсткость k_0 одного витка
3. Сравните теоретическую зависимость $\ell(n)$ с экспериментальной.
4. Определите m_0 и k_0

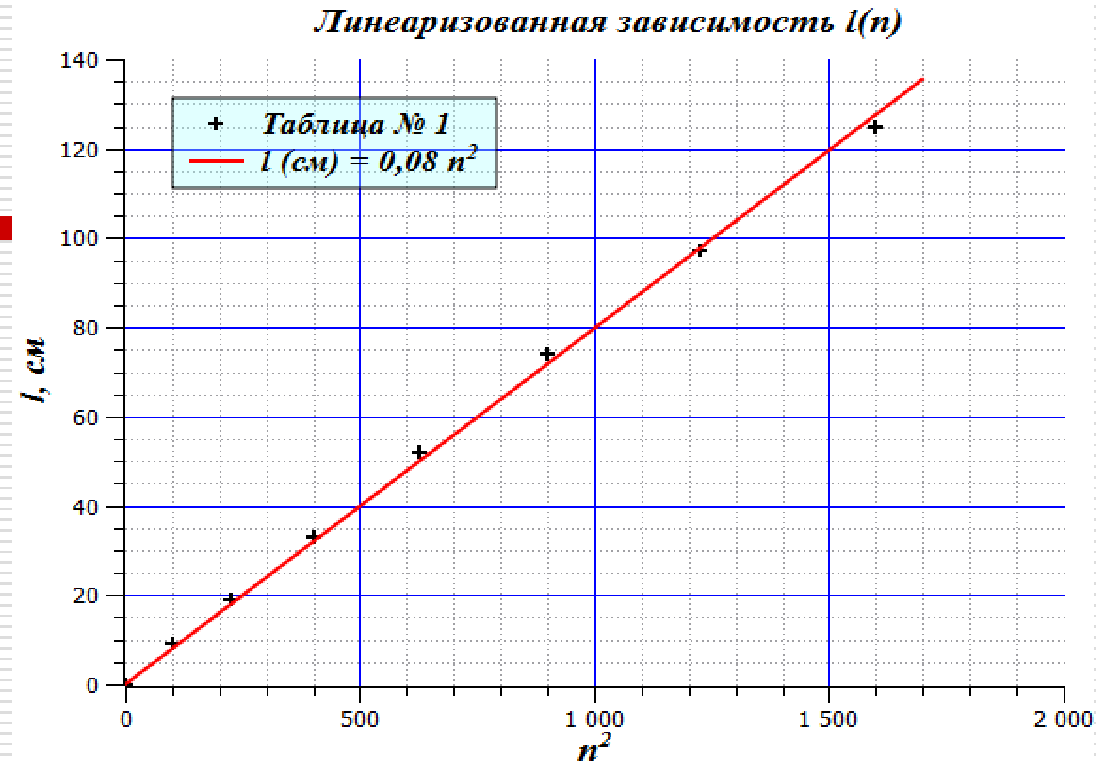
$\ell(n)$ - теория

- Получим теоретическую зависимость $\ell(n)$, выразив ℓ через массу m_0 и жёсткость k_0 одного витка:
  $\Delta x_1 = 0$
  $\Delta x_2 = m_0 g/k_0$
  $\Delta x_3 = 2m_0 g/k_0$
  ………………
  $\Delta x_n = (n - 1)m_0 g/k_0$ - арифметическая последовательность $\rightarrow$

  $\ell(n) = \Sigma\Delta x_i = n(n - 1)m_0 g/2k_0 \approx n^2\, m_0 g/2k_0$, т.е.

  $\ell = Cn^2$, где $C = m_0 g/2k_0$

ℓ(n) - эксперимент



- Из графика находим: $C = m_0g/2k_0 = 0{,}08$ см
- Определяем m_0 и k_0.
  Масса всей пружины M = 90,37 г, полное число витков N = 41,5 →
  масса одного витка: $m_0 = M/N = 2{,}18$ г;
- Жёсткость витка:
  $k_0 = m_0g/2C = 2{,}18 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81/2 \cdot 0{,}08 \cdot 10^{-2} \approx 13{,}4$ Н/м.

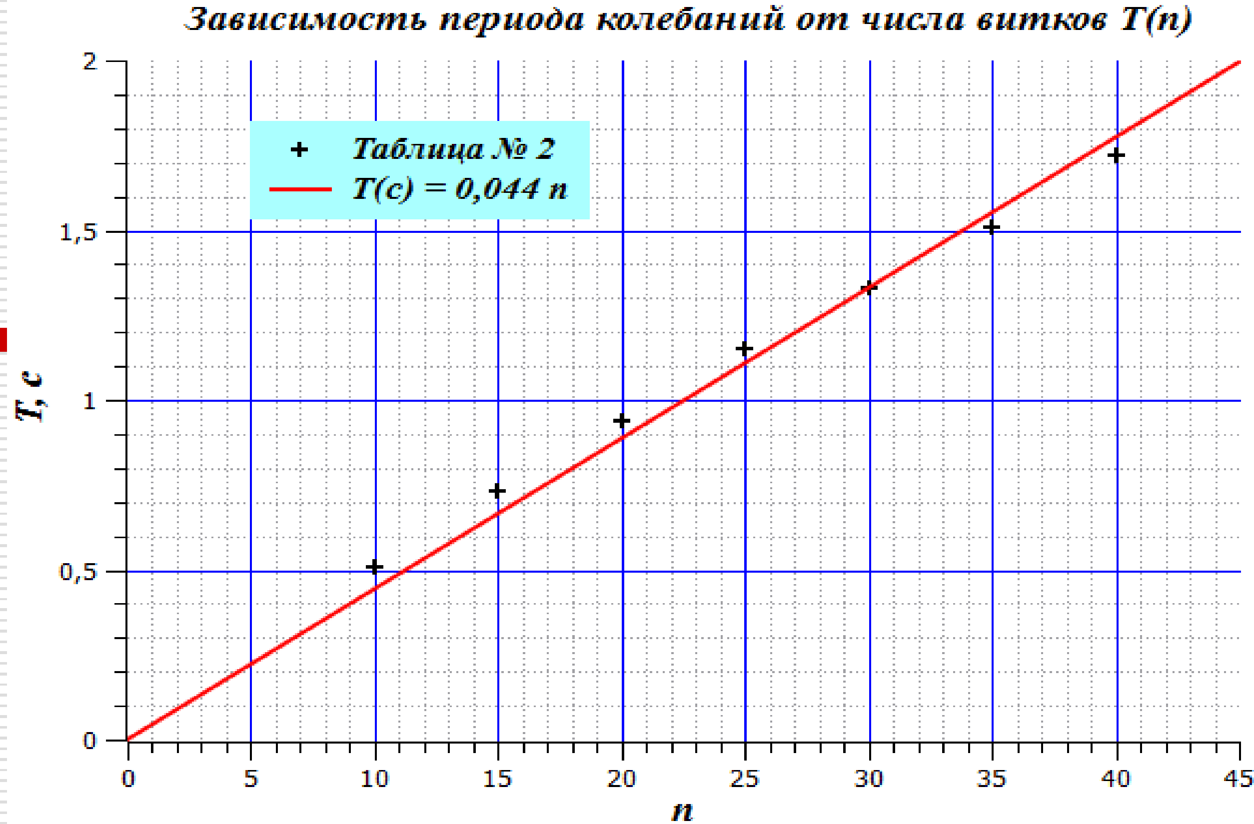
Задание (колебания)

1. Снимите зависимость T(n) периода колебаний T пружины, подвешенной вертикально, от числа n колеблющихся витков. Измерения проведите для $n \geq 10$. Результаты измерений занесите в Таблицу №2
2. Считая, что период T колебаний ***массивной*** пружины, подвешенной вертикально, определяется формулой
   $\mathbf{T = 2\pi(\beta m/k)^{1/2}}$,
   где m – масса пружины, k – жёсткость пружины, β – константа, получите теоретическую зависимость T(n).
3. Сравните теоретическую зависимость T(n) с экспериментальной и определите значение константы $\beta_{эксп}$
4. Сравните экспериментальное значение β с теоретическим.

T(n) - теория

- $T = 2\pi(\beta m/k)^{1/2} = 2\pi(\beta n m_0/(k_0/n))^{1/2} = 2\pi n\ (\beta m_0/k_0)^{1/2} = An$,
  где $A = 2\pi(\beta m_0/k_0)^{1/2}$
- $T \sim n$:
  $T = An$, где $A = 2\pi(\beta m_0/k_0)^{1/2}$

T(n) - эксперимент



- Итак T ~ n:
  $T = 0{,}044n$, $A = 0{,}044$ с
- Находим β:
  $T^2 = 4\pi^2 n^2 (2\beta m_0/2k_0) = 4\pi^2 n^2 (2\beta m_0 g/2gk_0) \approx 8\beta C n^2 \rightarrow$
  $8\beta C = A^2 \rightarrow \beta_{эксп} = A^2/8C = 0{,}044^2/8*(0{,}08*10^{-2}) = 0{,}303$
- **$\beta_{эксп}$ = 0,303**
- **$\beta_{теор}$ = 1/3; $\Delta\beta/\beta \approx 10$ %.**

Удельное электросопротивление воздуха IEPhO-4 (11 класс)

Оборудование

- Два теннисных шарика с небольшим ушком, покрытые проводящей (графитовой) краской; пластмассовая трубка; полиэтиленовый пакет; нить; две деревянные линейки; секундомер, скотч, ножницы
- *Примечание: в качестве вспомогательного оборудования можно использовать стол, стул, а также элементы конструкции вашей кабинки*

Погрешности

- *Эта работа оценочная. Погрешности оценивать не надо*

Задание

- С помощью имеющегося оборудования определите удельное сопротивление воздуха

Авторское решение

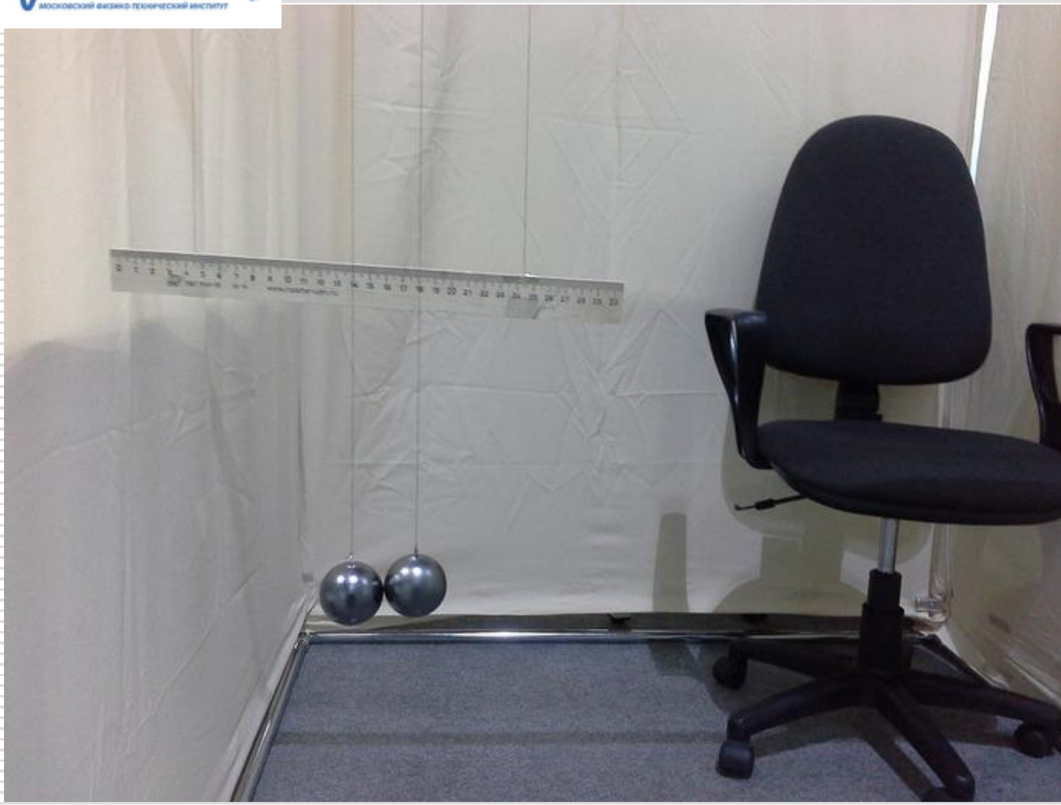
- Удельное сопротивление можно определить по скорости уменьшения заряда шарика:
  $q(t) = q_0 \exp(-t/\tau)$
  $\tau = \rho\varepsilon_0$ – время релаксации (Максвелловская релаксация)

С задачей ребята не справились…

Теория

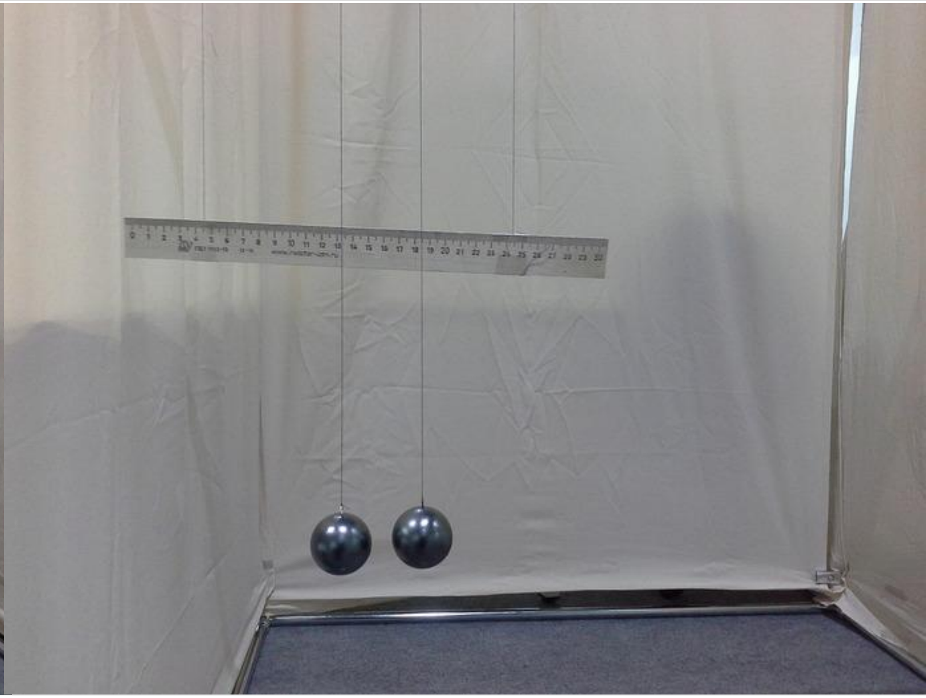
- Закон Ома в дифференциальной форме: $\mathbf{j} = 1/\rho\ \mathbf{E}$ ⇨ Заряд изменяется (убывает) со скоростью: $dq/dt = -\int \mathbf{j}\,d\mathbf{S} = -1/\rho \int \mathbf{E}\,d\mathbf{S}$ = {теорема Гаусса} **= -** $1/\rho\varepsilon_0\ q$ ⇨
- Дифферециальное уравнение для q: $dq/dt = -q/\rho\varepsilon_0 = -q/\tau$ ⇨ $dq/q = -t/\tau$ ⇨
- $q(t) = q_0 \exp(-t/\tau)$

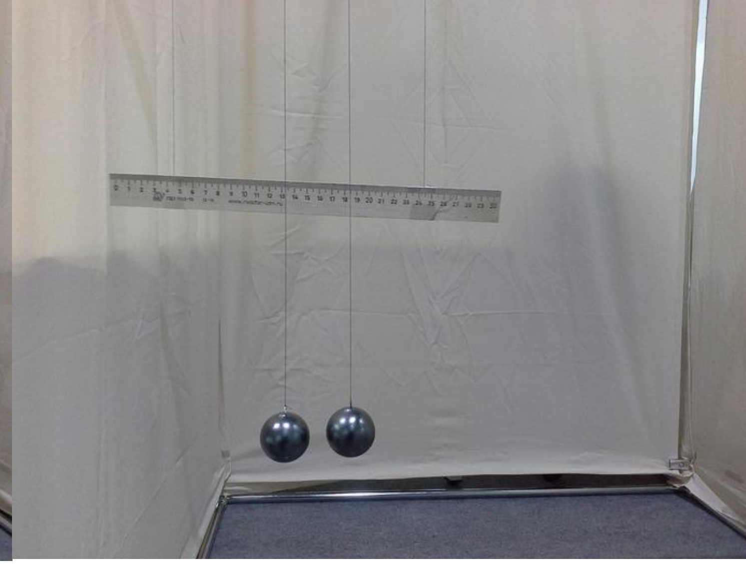
Эксперимент



- Подвешиваем шарики на длинных нитях (ℓ = 130 см). Расстояние между нитями = d (диаметр шарика) Незаряженные шарики при этом слегка соприкасаются
- На высоте ~ 20 см от шариков подвешиваем линейку в горизонтальном положении.

Калибровка



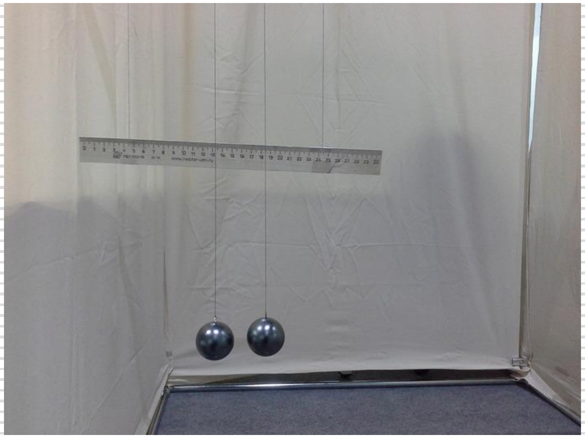


Калибровка

- Заряжаем шарики с помощью пластмассовой палочки, наэлектризованной трением о полиэтиленовый пакет. Измеряем расстояние между нитями на высоте линейки: $d_1 \approx$ 80 мм.

- Разряжаем один из шариков, коснувшись его рукой. После соприкосновения между собой шарики расходятся так, что расстояние между нитями на уровне линейки оказывается равным $d \approx$ 60 мм. Заряды шариков при этом уменьшаются вдвое.
- Калибровка проведена.

Основной эксперимент



- Вновь заряжаем шарики так, что расстояние между нитями, отсчитанное по линейке, вновь становится равным d_1= 80 мм.
- С помощью секундомера измеряем время $T_{1/2}$, за которое расстояние между нитями уменьшается до d_2= 60 мм. Это время соответствует уменьшению заряда вдвое.

Результаты

- $T_{1/2} \approx 14$ мин $= 840$ с ⇨
- $\tau = \rho\varepsilon_0 = T_{1/2}/\ell n2$ ⇨
  $\rho = T_{1/2}/\varepsilon_0 \ell n2 = 840/8{,}85*10^{-12}*0{,}7 \approx 1{,}4*10^{14}$ Ом м
- $\rho \approx 1{,}4*10^{14}$ Ом м
- $\rho_{табл} \approx (1\text{-}2)*10^{14}$ Ом*м

- Для сравнения: удельное сопротивление меди
  $\rho = 1{,}7*10^{-8}$ Ом*м $= (1{,}9*10^{-18}$ с (СГС))
- Стекло ~ 10^{12} Ом*м, полиэтилен ~ 10^{14} Ом*м

Система СГС

- 1 Ом = $1{,}1 \cdot 10^{-12}$ с/см
  [ρ] = 1 Ом*м = $1.1 \cdot 10^{-10}$ с
  время релаксации:
  $\tau = \rho/4\pi \Rightarrow$
  $\rho = 4\pi\,\tau = 4\pi T_{1/2}/\ln 2 \approx 1{,}5 \cdot 10^{4}$ с $\approx 1{,}4 \cdot 10^{14}$ Ом м

- Для справки:
  - Удельное сопротивление почвы
    $\rho_1 = \rho_2 \sim 10$ Ом м
  - Медь
    (5 км медного провода
    d = 1см имеет сопротивление R = 1 Ом)
    $\rho_{cu} \sim 1{,}7 \; 10^{-8}$ Ом м $\approx 1{,}9 \; 10^{-18}$ с)

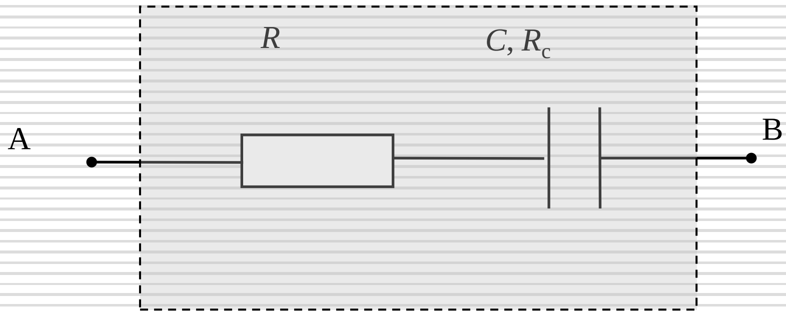
Конденсатор с утечкой Всеросс-2016, региональный этап (11 класс)

- **Цель работы**. Задача заключается в том, чтобы с помощью мультиметра, в котором не предусмотрена функция измерения электроёмкости, определить параметры элементов «серого ящика», включающего последовательно соединённые резистор и «полупробитый» конденсатор (конденсатор с утечкой).

Оборудование

«Серый ящик», мультиметр, секундомер (модель с памятью промежуточных этапов)

- Схема «серого ящика»: резистор R, последовательно соединённый с «полупробитым» конденсатором ёмкостью C и сопротивлением утечки R_C



Задание

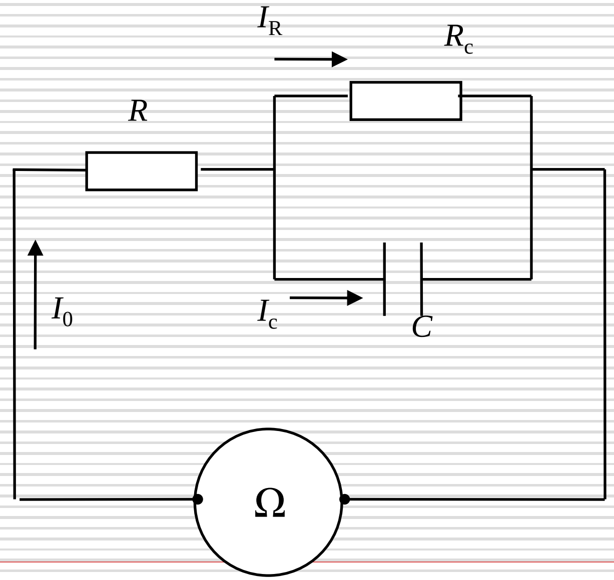
- Определить значения R, R_C и C элементов «серого ящика»

Указание: мультиметр в режиме омметра измеряет падение напряжения U_x на неизвестном резисторе R_x при фиксированной для данного диапазона силе тока I_0. На дисплей прибора выводится значение $R_x = U_x/I_0$. Серии измерений омметром рекомендуется проводить, не изменяя его диапазона.

Данная работа является оценочной и поэтому расчет погрешностей можно не делать

Эквивалентная схема

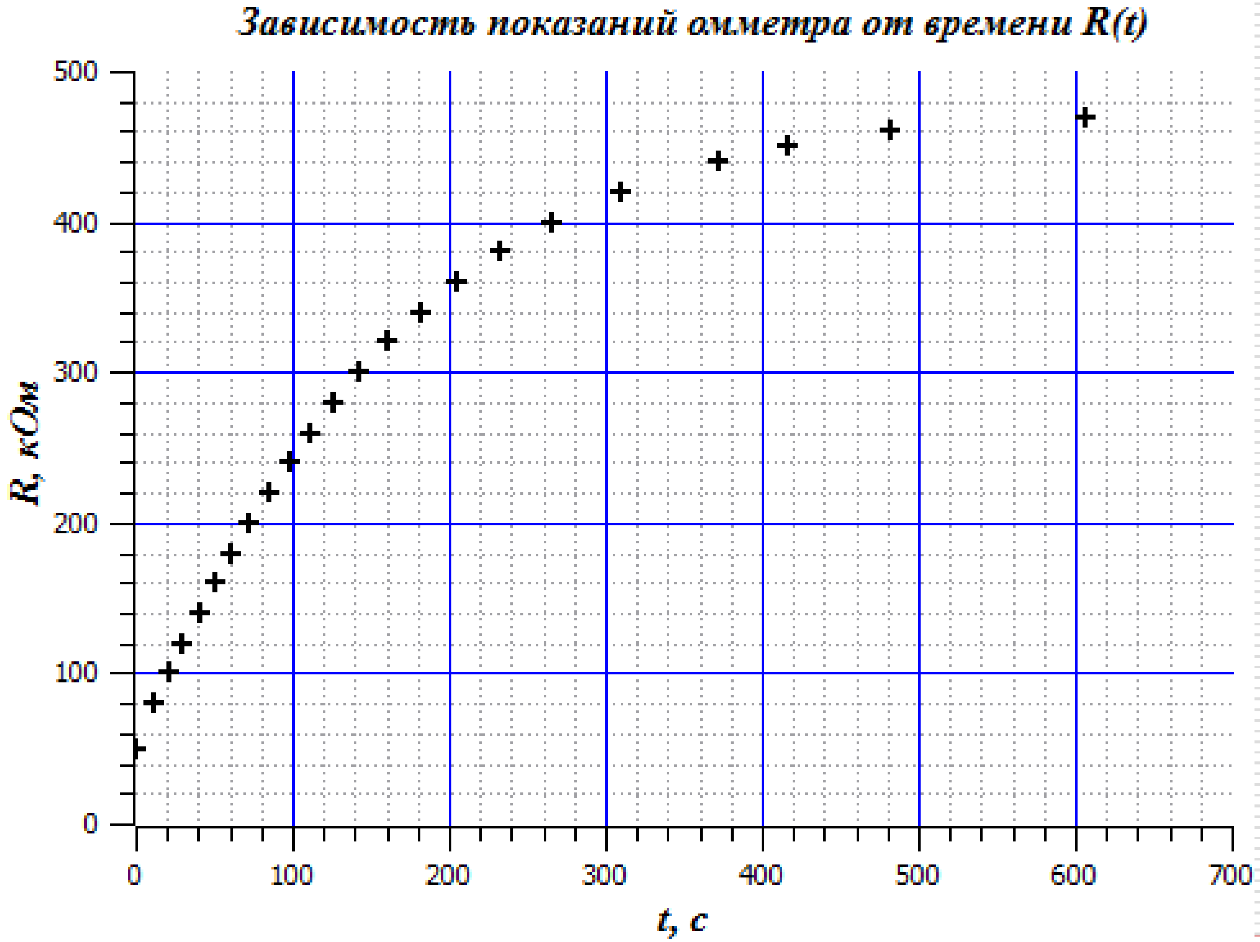
- Эквивалентная схема «серого ящика» (резистор *R* + конденсатор с утечкой), подключенного к омметру «Ω» показана на рисунке.



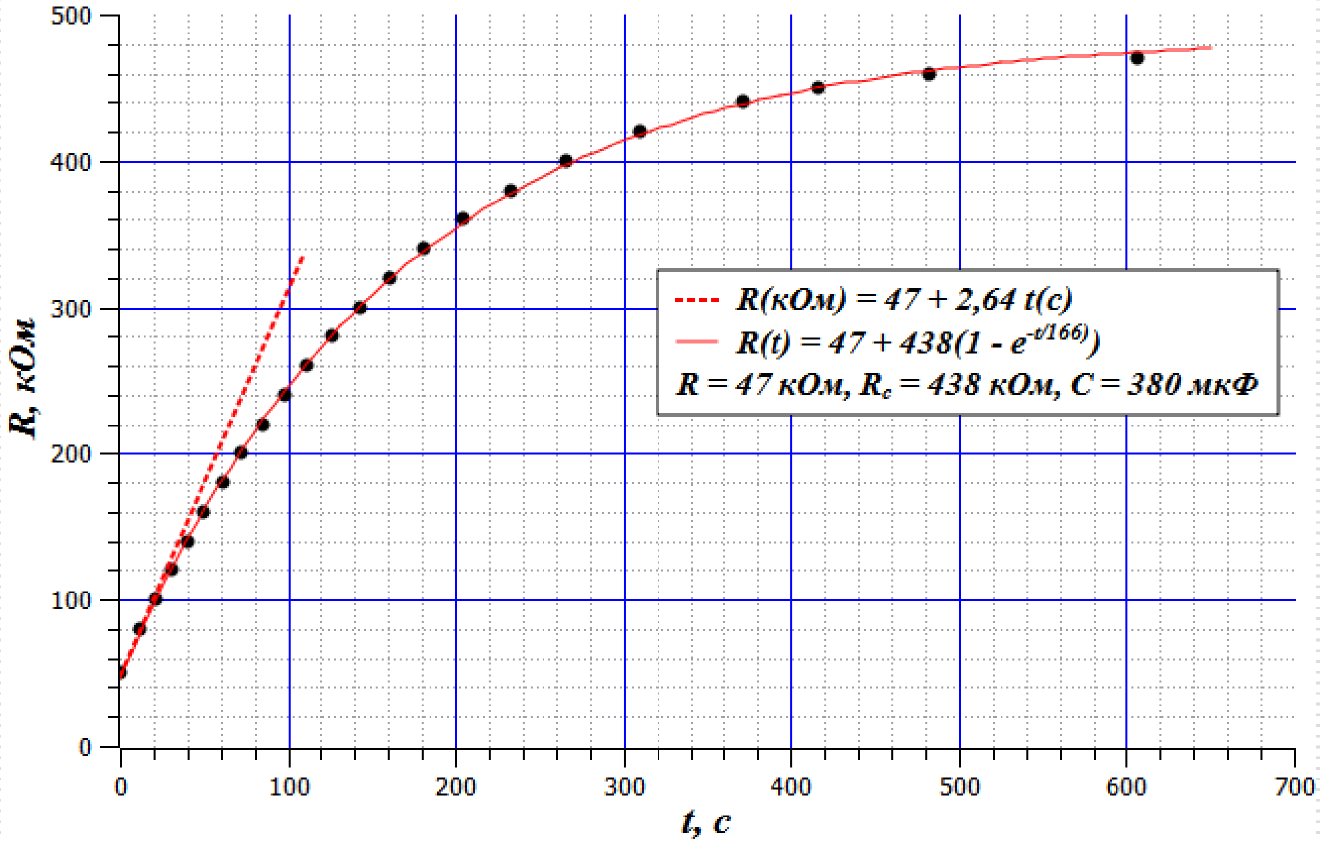
Снимаем зависимость R(t) – показаний омметра от времени

- ***Подготовка к измерениям.*** Перед измерениями конденсатор следует полностью разрядить. Для этого можно подключить выходы «серого ящика» к мультиметру в режиме амперметра и дожидаться нулевых показаний прибора.
- ***Зависимость R(t) – показаний омметра от времени.*** Переведём мультиметр, подключенный к выводам «серого ящика», из режима амперметра в режим омметра (диапазон «2М»). Показания омметра с течением времени монотонно увеличиваются. Не изменяя диапазона измерений, снимем зависимость $R(t)$ показаний омметра от времени. Результаты измерений представлены в таблице в Таблице.

Зависимость R(t)



Завсимость показаний омметра от времени R(t)



Анализ зависимости R(t)

- **$t << \tau = R_C C$**
  При малых временах, когда напряжение на конденсаторе U_c мало ($U_c << I_0 R_c$), практически весь ток I_0 омметра идёт через цепь конденсатора:
  $I_c \approx I_0$.
  Напряжение на конденсаторе изменяется по закону:
  $U_c = q/C \approx tI_0/C$.
  Полное падение напряжение во внешней цепи:
  $U_x = U_R + U_c = I_0(R + t/C)$.
  Соответственно, начальный участок зависимости $R(t)$ имеет вид:
  $R(t) = U_x/I_0 = R + t/C$
  Уравнение касательной вблизи $t = 0$ имеет вид:
  $R(кОм) \approx 50 + 2{,}6\ t(с)$, *откуда:*
  $R = R(0) \approx 50$ *кОм;*
  $C = \Delta t/\Delta R = 10^{-3}/2{,}6 \approx 380$ *мкФ*
- **$t >> \tau$**
  При больших временах ($t >> \tau \sim 3$ *мин*.) конденсатор полностью заряжен, практически весь ток идёт через сопротивление R_c, а показания омметра стремятся к константе (см. график зависимости $R(t)$):
  $R(\infty) = R + R_C \approx 480$ *кОм*
  Следовательно, сопротивление утечки конденсатора:
  $R_C = R(\infty) - R = 430$ *кОм*

Полная зависимость R(t)

- $R(t) = R + R_c(1 - e^{-t/\tau})$, где $\tau = R_cC$ – постоянная времени R_cC – цепочки.
- Наилучшим образом эта зависимость аппроксимирует экспериментальные точки при следующих значениях параметров (см. рис.):
  R = 47 кОм, Rc = 438 кОм, τ = 166 с, откуда $C = \tau/R_c \approx 380$ *мкФ*.

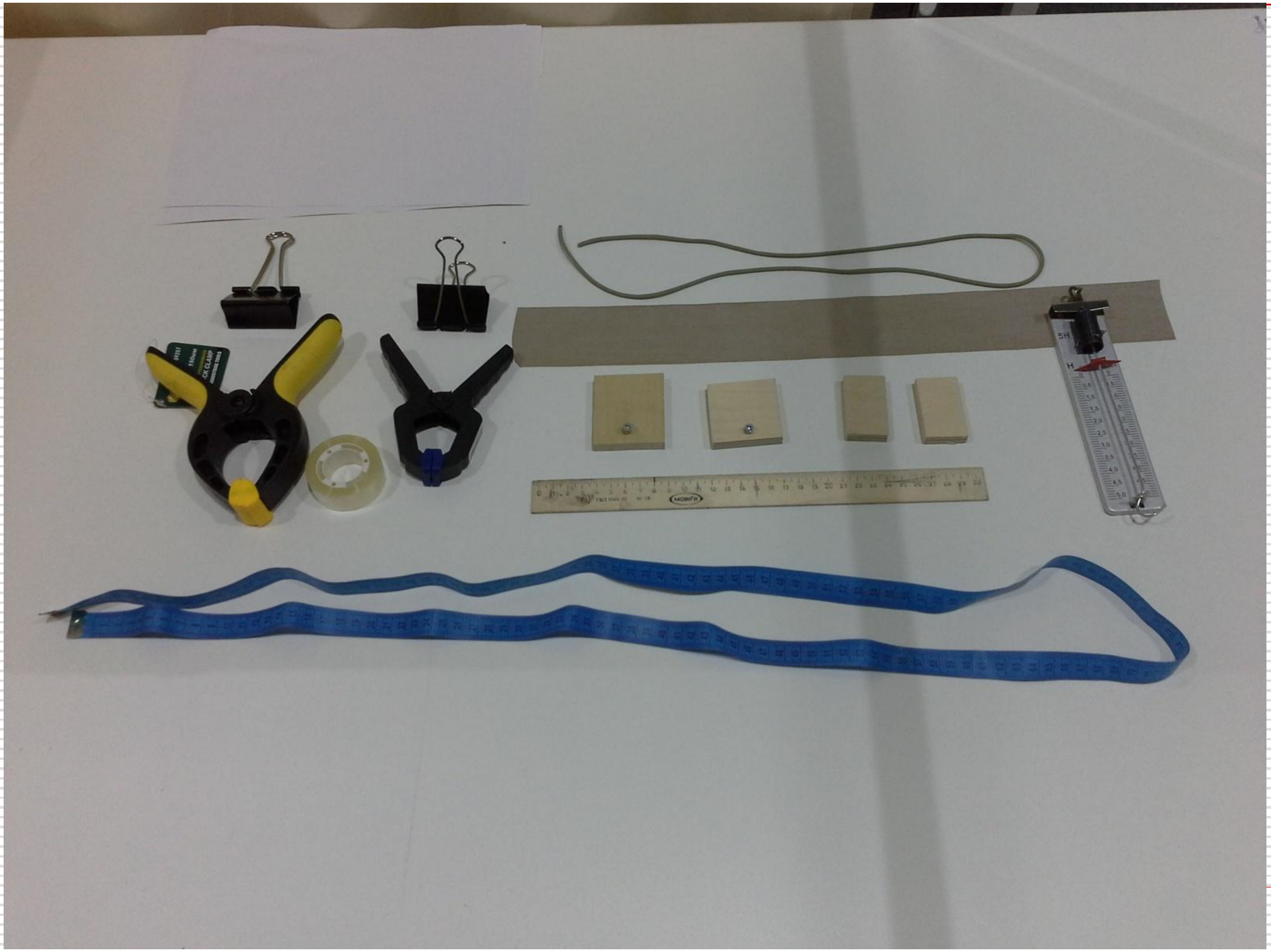
Тянем резину
IEPhO-4 (11 класс)

Упругие свойства резины:
Гук или не Гук ???

Оборудование

- Резиновый шнур диаметром d_0 = 2,5 мм; резиновая лента (бинт); динамометр; две канцелярские клипсы; две струбцины; четыре деревянных бруска (два из них – с саморезами); мерная лента; линейка; ножницы; скотч.

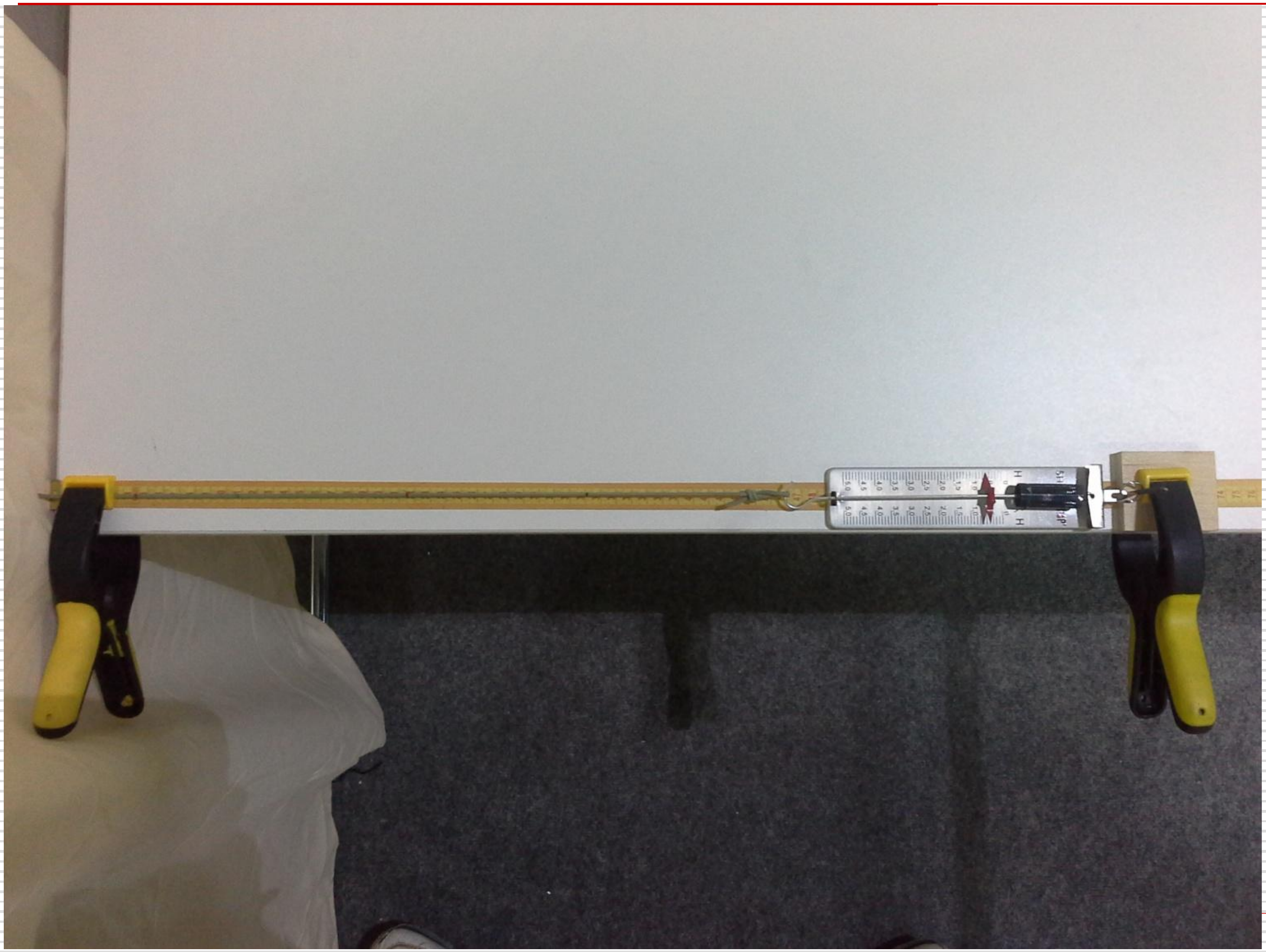
Оборудование (картинка)



Задание №1

- Снимите зависимость относительной длины ℓ/ℓ_0 резинового шнура от приложенной силы F вплоть до значений $\ell \sim 3\ell_0$, где ℓ_0 – длина недеформированного куска шнура.

Установка (например, вот так)



Задание № 2

- Выразите коэффициент жёсткости резинового шнура через модуль Юнга и его геометрические параметры

- *Решение:*
  По закону Гука:
  $\Delta\ell/\ell = \Delta F/ES \rightarrow \Delta F = (ES/\ell)\,\Delta\ell = k\Delta\ell \rightarrow$
  $k = ES/\ell$,
  где $S = \pi d^2/4$ – поперечное сечение цилиндрического шнура

Задание № 3

- Предполагая, что модуль Юнга и объём резины в процессе деформации не изменяются, получите теоретическую зависимость ℓ/ℓ_0 от F

Теоретическая зависимость ℓ(F)

- По закону Гука для небольших деформаций:
  $\partial\ell/\ell = \partial F/ES \rightarrow$
  $\partial\ell/\ell^2 = \partial F/ES\ell = \partial F/EV_0$.
  $V = S\ell = S_0\ell_0 = \pi d_0^2\ell_0/4$ – объём
  ℓ_0, d_0 – длина и диаметр
  $S_0 = \pi d_0^2/4$ - площадь сечения недеформированного шнура.
  Интегрируем уравнение:
  $\partial\ell/\ell^2 = \partial F/EV_0 \rightarrow 1/\ell_0 - 1/\ell = F/EV_0 \rightarrow$

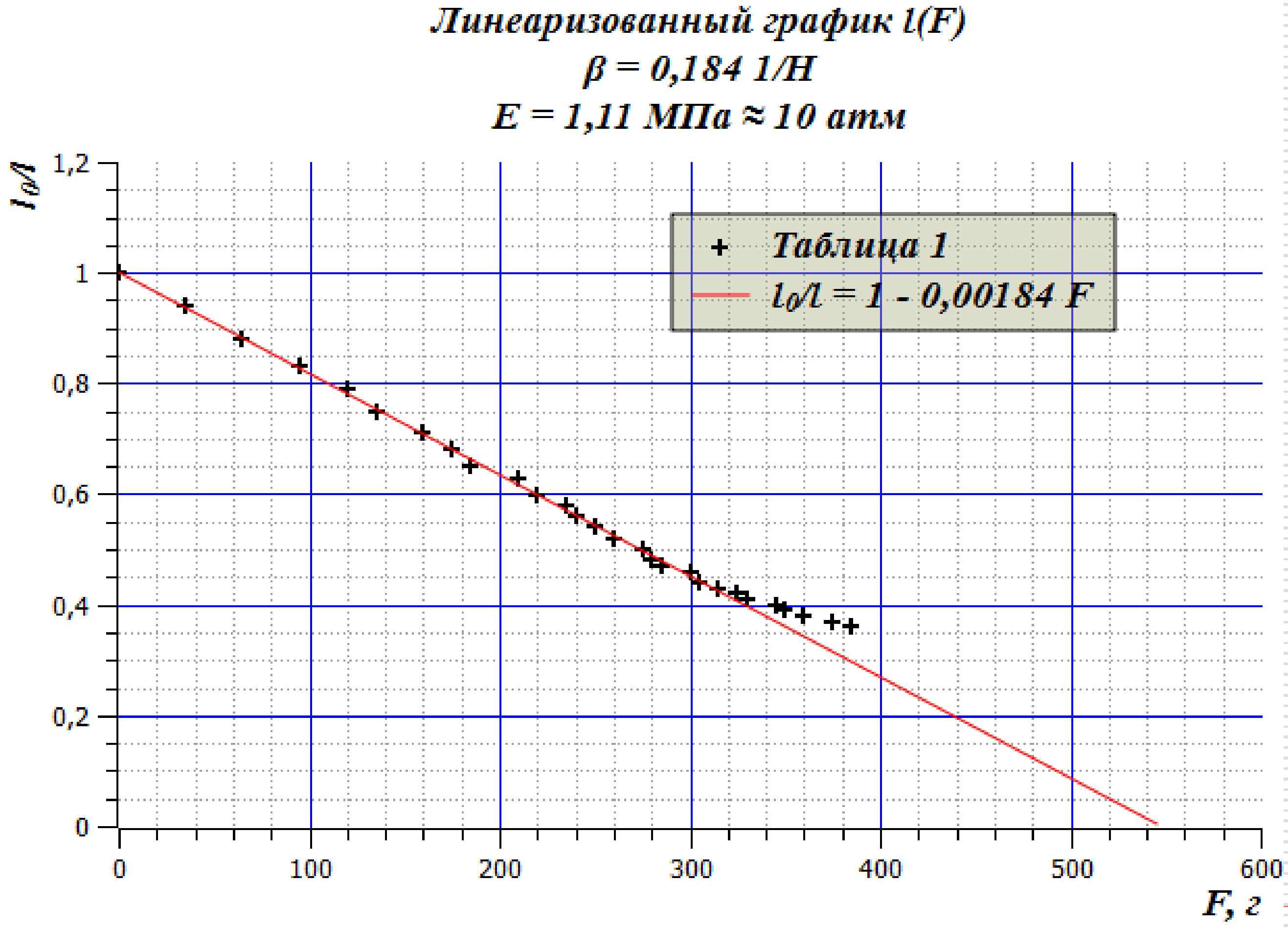
Рабочая формула

- **$\ell/\ell_0 = 1/(1 - F/ES_0)$** – зависимость $\ell(F)$ при условии, что:
  - модуль Юнга $E = const$
  - объём резины $V = const$
- **$\ell_0/\ell = 1 - F/ES_0$**– линеаризованная зависимость $\ell(F)$.
  Отсечка по оси абсцисс $F_0 = ES_0$

Задание № 4

- Сравните экспериментальную зависимость с теоретической, полученной в П.3

Линеаризованный график зависимости *(F):*
$\ell_0/\ell = 1 - F/ES_0$; $E = 110$ Н/см^2



Выводы

- Вплоть до деформаций $l/l_0 \sim 2{,}5$ модуль Юнга резины в пределах точности эксперимента является постоянной величиной
$E = (110 \pm 10)$ Н/см^2 ($\sim$ 10 бар $= 10^6$ Па)
- *Для справки*:
Сталь: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па = 2 Мбар
Медь: $E = 1{,}3 \cdot 10^{11}$ Па = 1,3 Мбар
Лёд: $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па = 0,3 Мбар
Желатин: $E = 24{,}6 \cdot 10^3$ Па $\approx$ 0,25 бар

Задание № 7

- Найдите теоретическое значение коэффициента Пуассона μ, при котором объём резинового шнура при деформациях не изменяется.

При каких μ объём не изменяется?

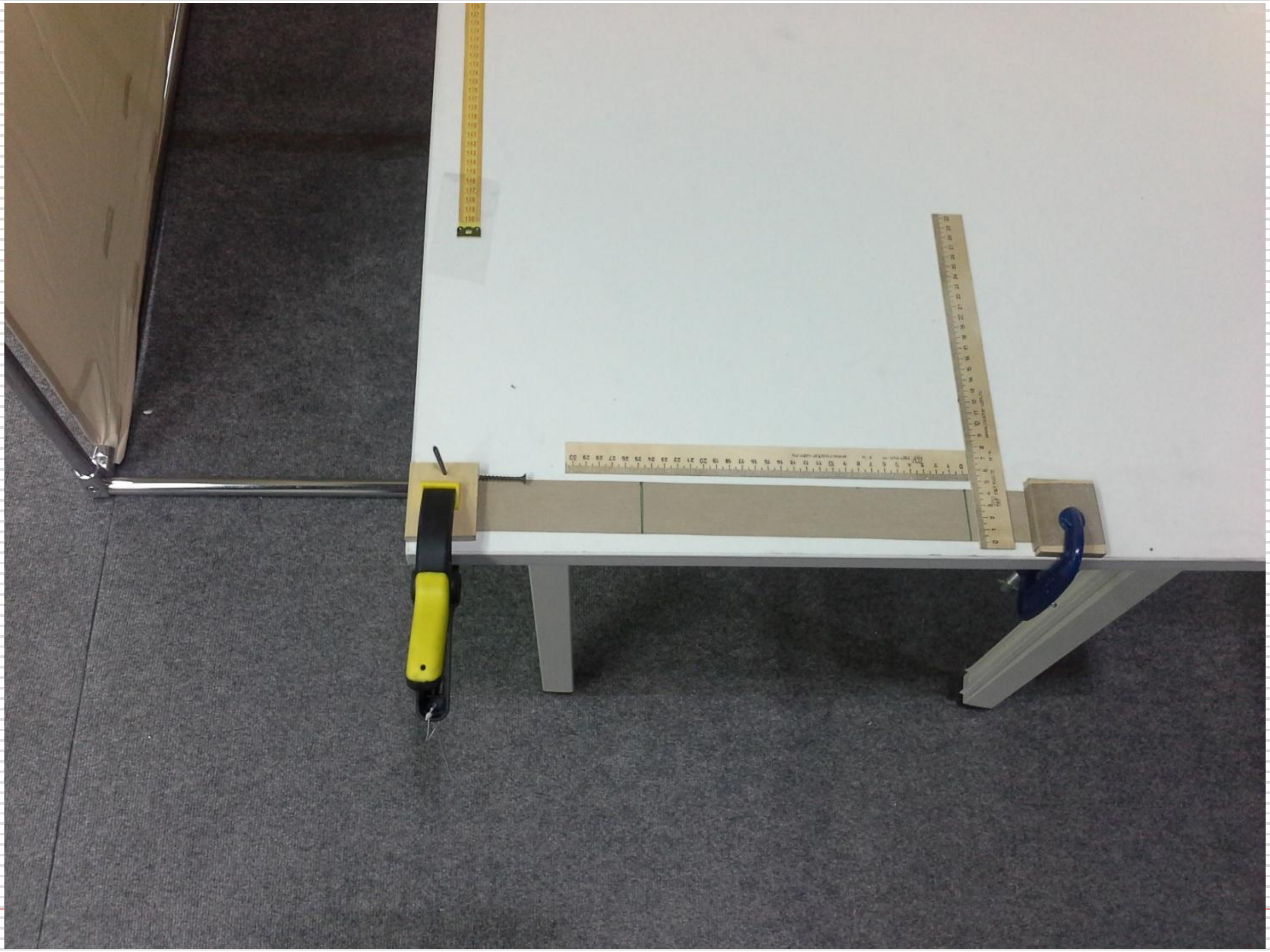
- Для шнура цилиндрической формы длиной ℓ и диаметром d объём:
  $V = \pi\ell d^2/4 = \pi\ell_0 d_0^2/4 \rightarrow (d/d_0)^2 = \ell_0/\ell \rightarrow$

  $2\Delta d/d = - \Delta\ell/\ell \rightarrow$
  $\Delta d/d = - ½ \Delta\ell/\ell \rightarrow$
  $\mu = - ½$ - <u>при таком значении коэффициента Пуассона объём материала при его деформациях не изменяется</u>

Задание № 8

- Определите экспериментально коэффициент Пуассона резины, из которой изготовлен резиновый бинт

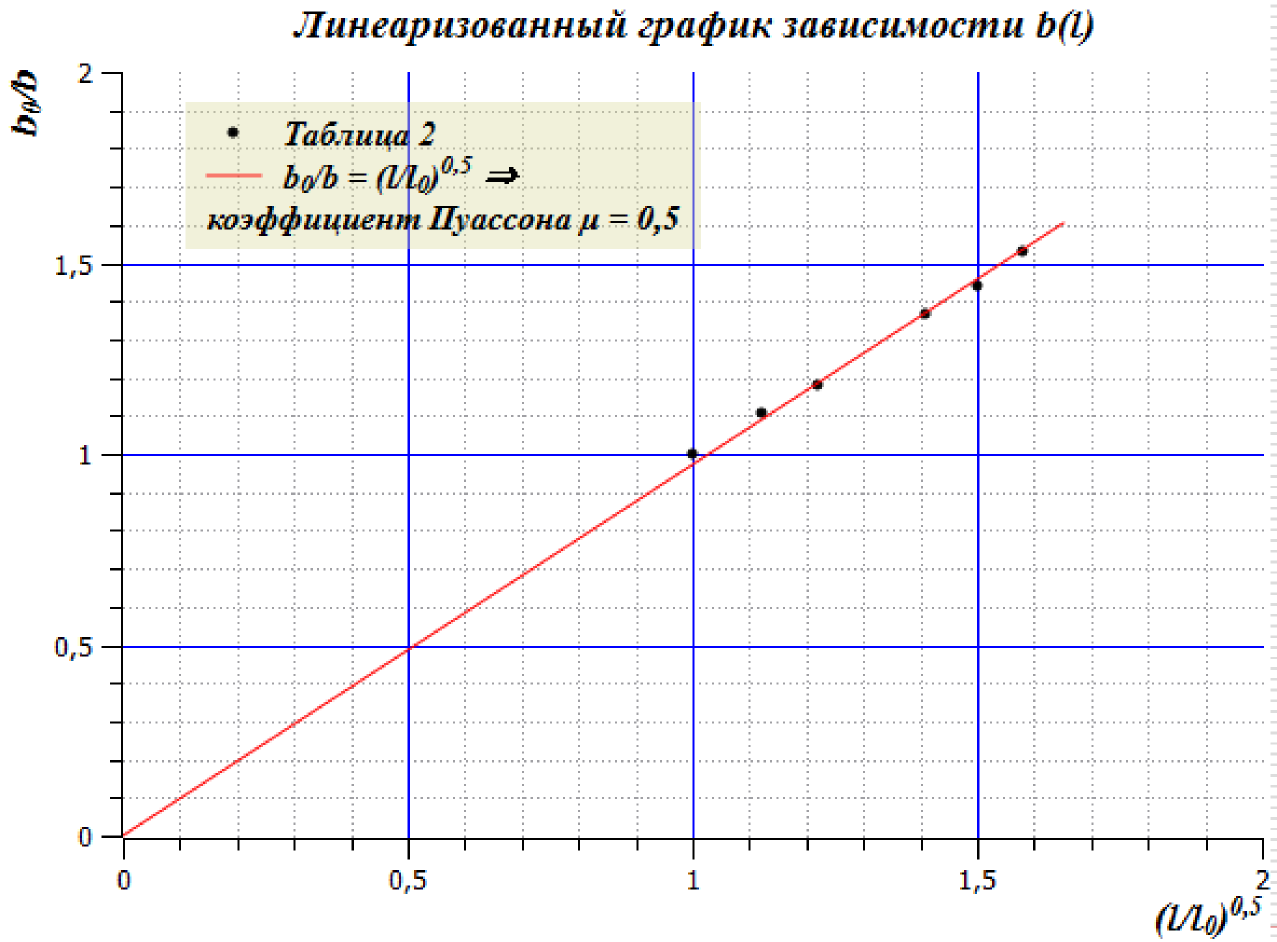
Определяем коэффициент Пуассона (установка)



Теория

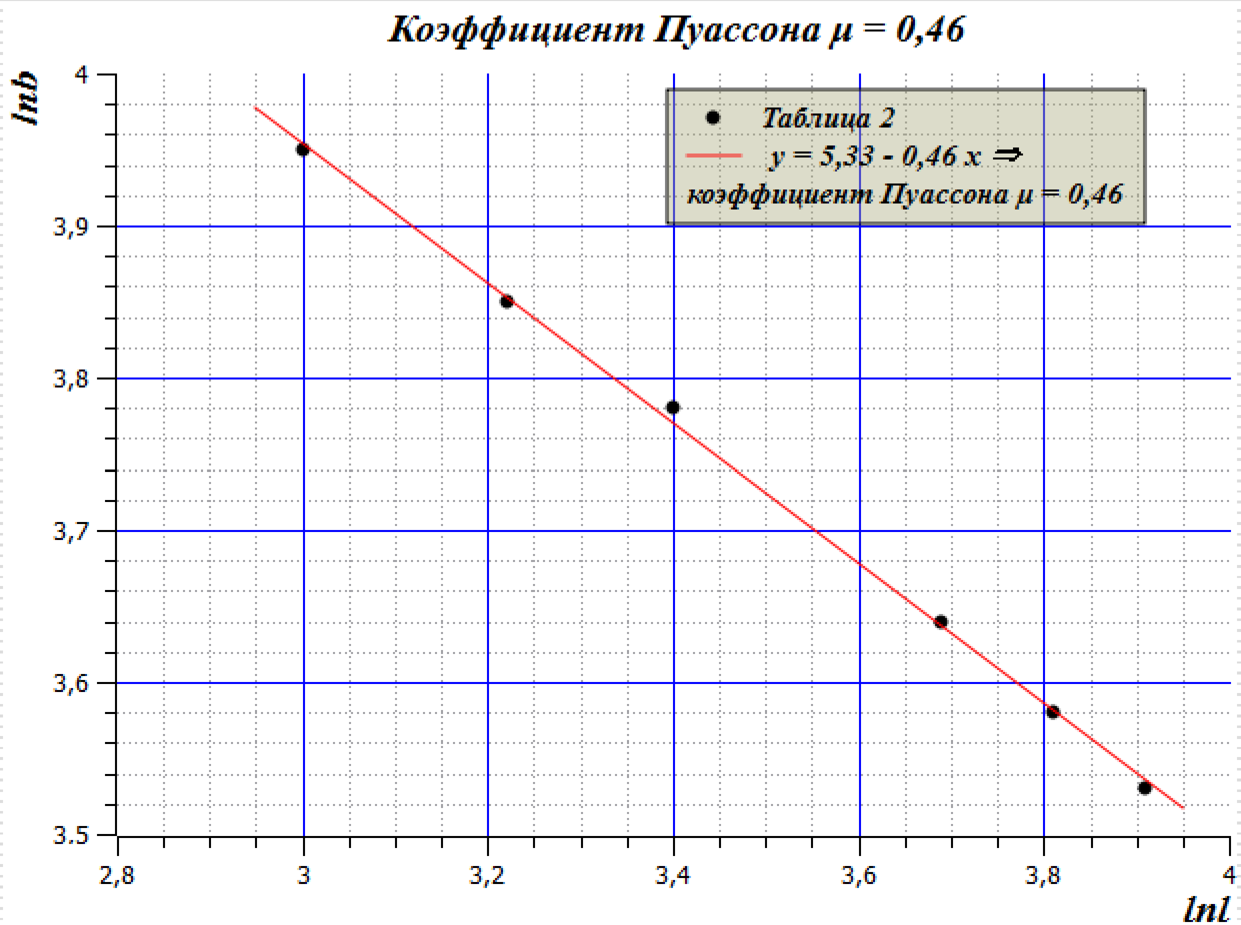
- $db/b = -\mu d\ell/\ell \rightarrow b(\ell)$:
  $b/b_0 = -(\ell/\ell_0)^\mu$
  $\ln b = C - \mu \ln \ell \rightarrow$
  в двойном логарифмическом масштабе тангенс угла наклона прямой $b(\ell)$ равен коэффициенту Пуассона

Результаты: коэффициент Пуассона μ ≈ 0,5



Двойной логарифмический масштаб:

$\mu = 0{,}46$



Оборудование

Три воздушных шарика в форме сосиски, насос (груша с клапаном и вентилем) известного объёма (40 мл), медицинский манометр, тройник, соединительные трубки, бумажный метр, штангенциркуль, ножницы, скотч, беруши (вставлять в уши)

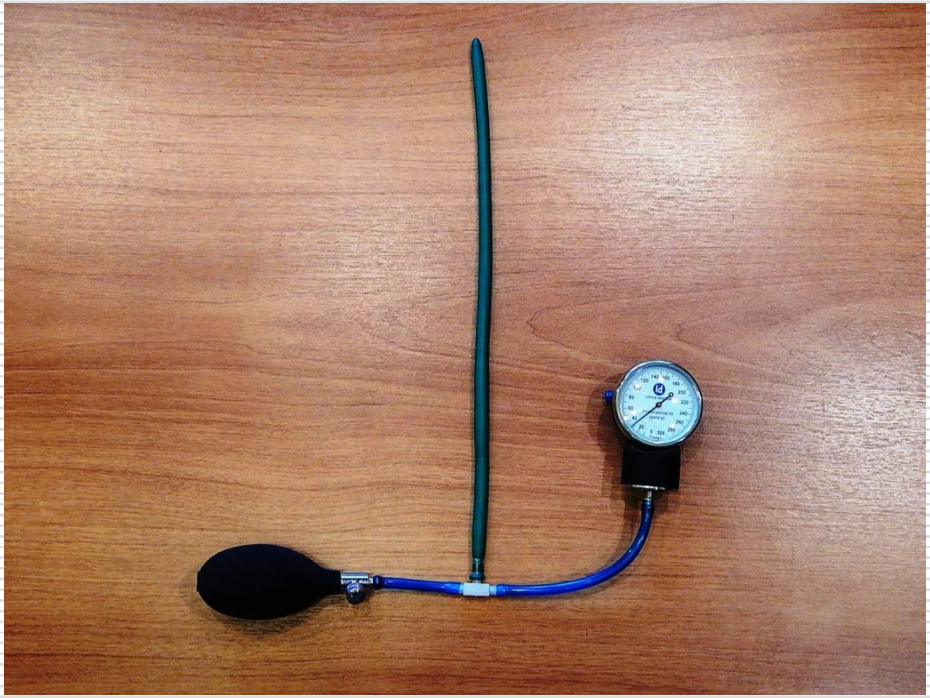
Определение мощности взрыва воздушного шарика в тротиловом эквиваленте (Туймаада-2013, 10,11 классы)

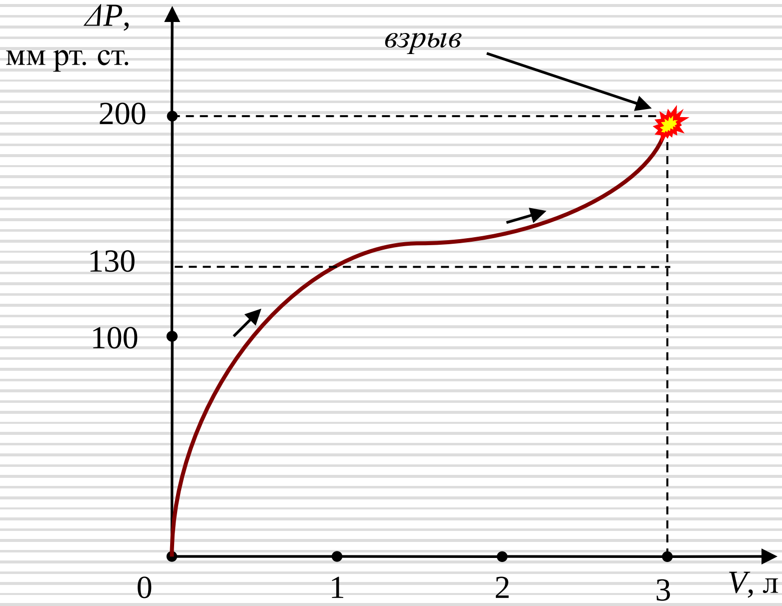
- 1 г ТНТ= 1 ккал = 4184 Дж ≈ 4,2 кДж

Задание

1. Снимите зависимость избыточного давления ΔP в шарике от его объёма V и изобразите результаты на графике.
2. Определите критическое избыточное давление ΔP_{max} и критический объём V_{max} шарика, при которых он лопается.
3. Оцените энергию $W_{упр}$ упругой деформации оболочки в момент взрыва шарика.
4. Оцените энергию $W_{воз}$ ударной волны, возникающей в результате резкого расширения воздуха при взрыве (без учёта влияния оболочки).
5. Вычислите полную мощность взрыва $W = W_{упр} + W_{воз}$ шарика в тротиловом эквиваленте.
6. Рассчитайте доли (в %) упругой энергии $\eta_{упр} = W_{упр}/W$ и энергии ударной волны $\eta_{воз} = W_{воз}/W$ в полной энергии взрыва шарика. Сравните их.
7. Оцените предел прочности $\sigma_{пр}$ и величину максимальной относительную деформации $\varepsilon_{пр}$ резины, из которой изготовлен шарик.

Схема установки, график ΔP(v)



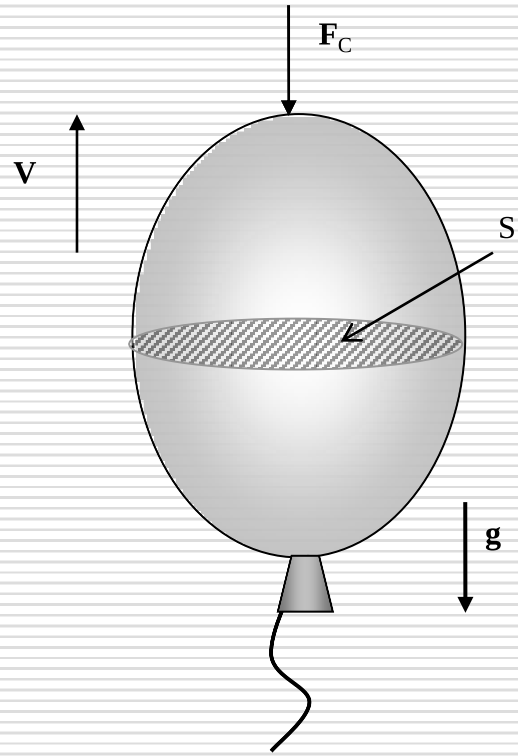


Результаты

- ***Критические параметры ΔP_{max}, V_{max}***
  Из графика находим критические параметры, при которых шарик взрывается:
  ΔP_{max} = 200 мм. рт. ст. ≈ 26,3 кПа;
  V_{max} = 3 л.
- $W_{упр} = A$ = 51 Дж
- $W_{воз} = P_0 \Delta V = 1/\gamma \Delta P_{max} V_{max} = 5/7\ \Delta P_{max} V_{max}$ = 57 Дж
- Полная мощность взрыва:
  $W = W_{упр} + W_{воз}$ ≈ 107 Дж ≈ 26 мг в тротиловом эквиваленте.
- Для звукового эффекта мощностью в 1 кг в т.э. потребуется одновременно взорвать ~ 40 тысяч(!) шариков

Воздушный шарик. Сила сопротивления
(Всеросс-2012, финал; 9-11 классы)

- ***Целью работы*** является экспериментальное изучение закона сопротивления движению воздушного шарика; применение метода размерностей. В работе измеряется коэффициент лобового сопротивления.



Всеросс-2012

Оборудование

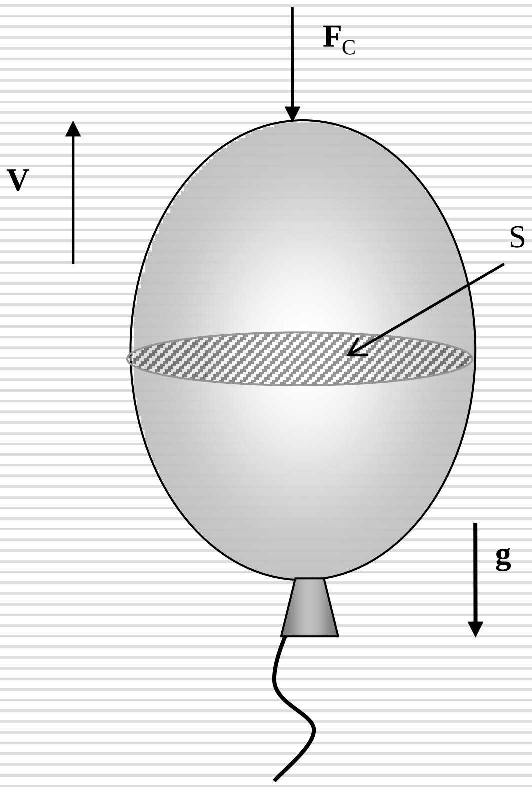
- Воздушный шарик с лёгкой ниткой, наполненный гелием, кусочек пластилина, 50 скобок для степлера (или 10-20 небольших скрепок), секундомер, весы, мерная лента, линейка, рулетка. ***Примечание:*** считайте, что скорость шарика устанавливается на пути порядка размера шарика.

Задание

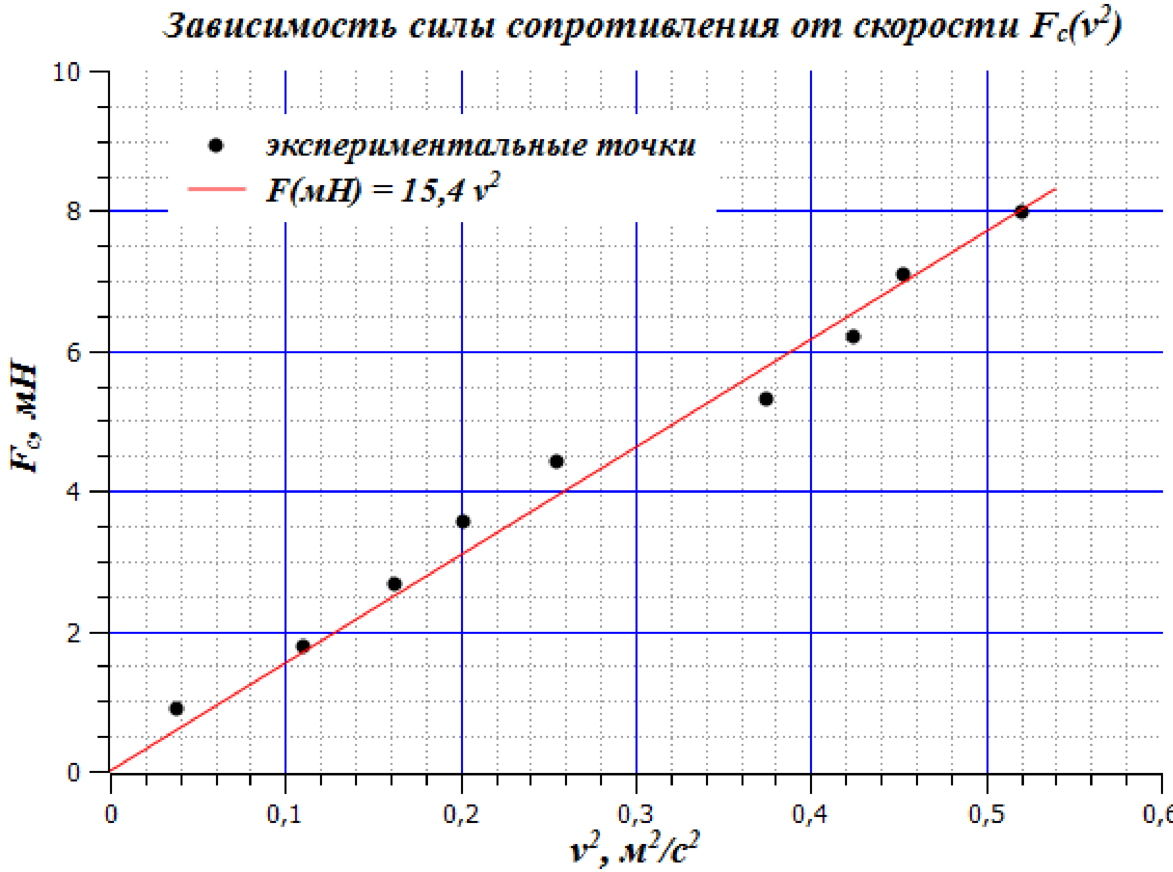
- Определите (теоретически) показатели степени *q, f* и *p* в формуле $F_c = \beta S^q v^f \rho^p$. Полученную формулу $F_C(v)$ занесите в Таблицу № 1.
- Определите массу m_1 одной скобки.
- Определите высоту *H* вашей аудитории от пола до потолка.
- По известному атмосферному давлению P_A и температуре в комнате t_K рассчитайте плотность воздуха ρ в аудитории.
- Определите площадь *S* максимального поперечного сечения шарика.
- Прикрепите к шарику груз в виде кусочка пластилина со скобками (~ 10 -20 штук) так, чтобы он находился в равновесии.
- Снимите зависимость силы сопротивления F_C от скорости подъёма шарика.
  Для этого отцепляйте от уравновешенного шарика по одной (или несколько) скобки и для каждого количества отцепленных скобок измеряйте скорость подъёма шарика. (Очевидно, что в установившемся режиме $F_C = \Delta m g$, где Δm – масса удаленных скобок). Скорость установившегося движения определяется по формуле $v = h/t$, где t – время подъёма шарика на высоту *h*. (Не забывайте, что скорость устанавливается не сразу, а на пути порядка размера шарика). Результаты измерений занесите в Таблицу № 1.
- Сравните экспериментальную зависимость $F_C(v)$ с теоретической, полученной в П. 1.
- По результатам измерений определите значение коэффициента β.

Рабочая формула

- $Fc = \beta S^q v^f \rho^p = \beta S^q v^f \rho^p$
- $q = 1, f = 2, p = 1$
- $F_c = \beta \rho v^2 S$



Результаты



- $F_c(мН) = 15{,}4v^2$
- $\beta = k/\rho S = (0{,}33 \pm 0{,}05)$, $\varepsilon = 15\ \%$

Всеросс-2012

Определение коэффициента диффузии гелия через резиновую оболочку воздушного шарика (Всеросс-2014, финал; 10, 11 классы)

- ***Целью данной работы*** является знакомство с одним из явлений переноса – диффузией. В работе экспериментально определяется коэффициент диффузии гелия через резиновую оболочку воздушного шарика.

Оборудование

- Два одинаковых резиновых шарика, один из которых накачан гелием, весы, секундомер, небольшой груз (гайка), нитка, ножницы, бумажный метр, штангенциркуль.

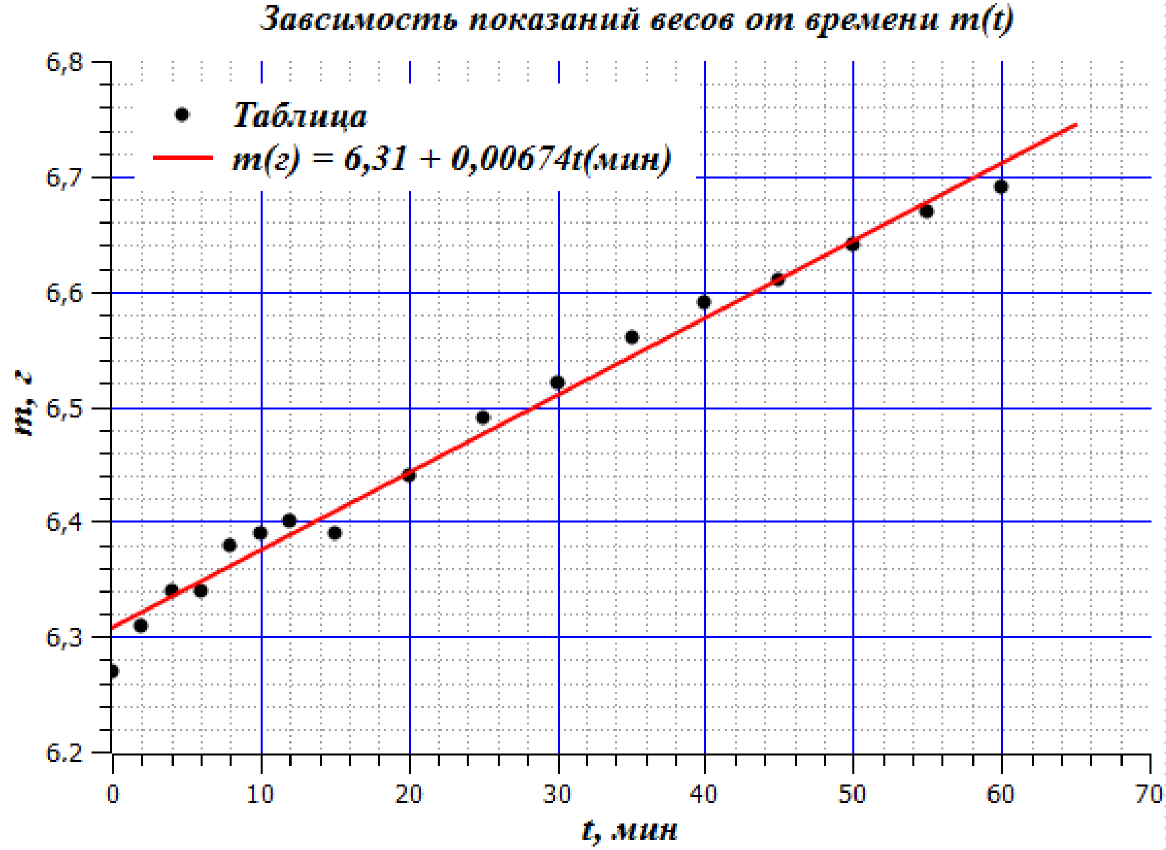
Необходимые данные

- *Молярная масса воздуха и гелия $\mu_{воз}$ = 29 г/моль, μ_{He} = 4 г/моль.*
- *Давление в шарике считайте равным атмосферному давлению в аудитории $p_0 = 10^5$ Па.*
- *Температура в аудитории t = 23 ^{0}C.*
- *Плотность резины $\rho_{рез}$ = 1,05 г/см^3.*
- *Ускорение свободного падения g = 9,8 м/с^2.*
- *Считайте, что при надувании шарика плотность резины не изменяется. Утечкой гелия через узел можно пренебречь.*

Рабочая формула

- *закон Фика*:
  $j = D\Delta n/\delta$ – плотность потока молекул гелия через оболочку тощиной δ
- $\Delta F_п/F_п = \Delta V/V = \Delta N/N = -DSt/V\delta$
- $F_п(t) = F_0 - DS(\rho_0 - \rho_{He})gt/\delta$ – так изменяется подъёмная сила с течением времени
- Зависимость показаний весов от времени:
  $m(t) = m - F_п/g = m_0 + \beta t$,
  где $\beta = DS(\rho_0 - \rho_{He})/\delta$

Результаты



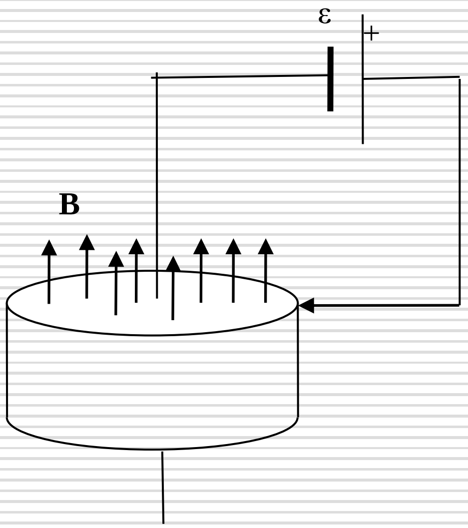
m(г) = 6,31 + 0,00674t(мин)

$D = \beta\delta/S(\rho_0 - \rho_г) \approx 1*10^{-7}$ см^2/с

Униполярный двигатель

Задача про индуктор

- B = 1 Тл
- R_0 = 2 см
- ЭДС = 1,5 В
- $v_{пред}$ = ?



Предельная скорость вращения ~ 70 тыс.об/мин

- Диск разгоняет механический момент силы, возникающий в результате взаимодействия магнита с электрическим током во внешней, неподвижной части электрической цепи, играющей роль статора. По мере разгона ротора увеличивается наведённая ЭДС $\varepsilon_{инд}$, направленная, по правилу Ленца, против ЭДС батарейки. Разгон диска прекратится, когда ЭДС батарейки сравняется с $\varepsilon_{инд}$, и ток в цепи станет равным нулю. Для выполнения этого условия диск должен вращаться также против часовой стрелки, если смотреть сверху. Предельную скорость вращения находим из условия:
  $\varepsilon_{инд} = \Delta\varphi = \varepsilon$, или $\pi\nu_{пред} r_0^2 B = \varepsilon \rightarrow$

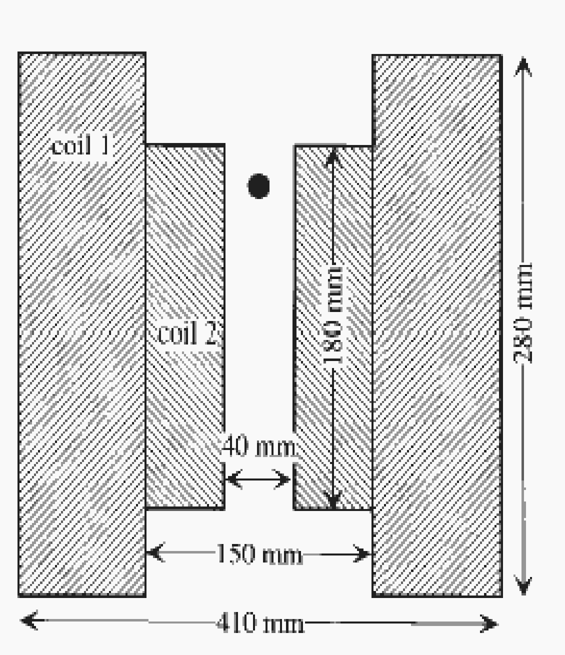
  $\nu_{пред} = \varepsilon / \pi r_0^2 B = 71{,}7 * 10^3$ об/мин.

Про магнитную левитацию

Лауреаты Нобелевской премии по физике 2010 года – выпускники Физтеха

- Нидерландский физик Андрей Гейм (МФТИ, ФОПФ, 1982 г.) и британский физик Костя Новосёлов (МФТИ, ФФКЭ, 1997 г.) Нобелевская премия присуждена за открытие и исследование графена – мономолекулярного слоя графита с уникальными электронными, механическими и оптическими свойствами

Магнитная микрогравитация



Фотографии из статьи:
Geim A. Everyone`s Magnetism, Physics Today,

Магнитная левитация живого организма. Андрей Гейм. (Шнобелевская ☺ премия, 2000 г.)

- Фотография из статьи:
  Geim A. Everyone`s Magnetism, Physics Today, September 1998.

Левитирующая в магнитном поле лягушка

Диамагнитная левитация

Задание №1

- *Определить расположение северного и южного полюсов магнитного шара*

Магнитное поле Земли.

- Магнитное поле Земли соответствует полю однородно намагниченного шара = полю диполя, расположенного в центре Земли.
- Величина:
  $B \sim 50$ мкТл = 0,5 Гс

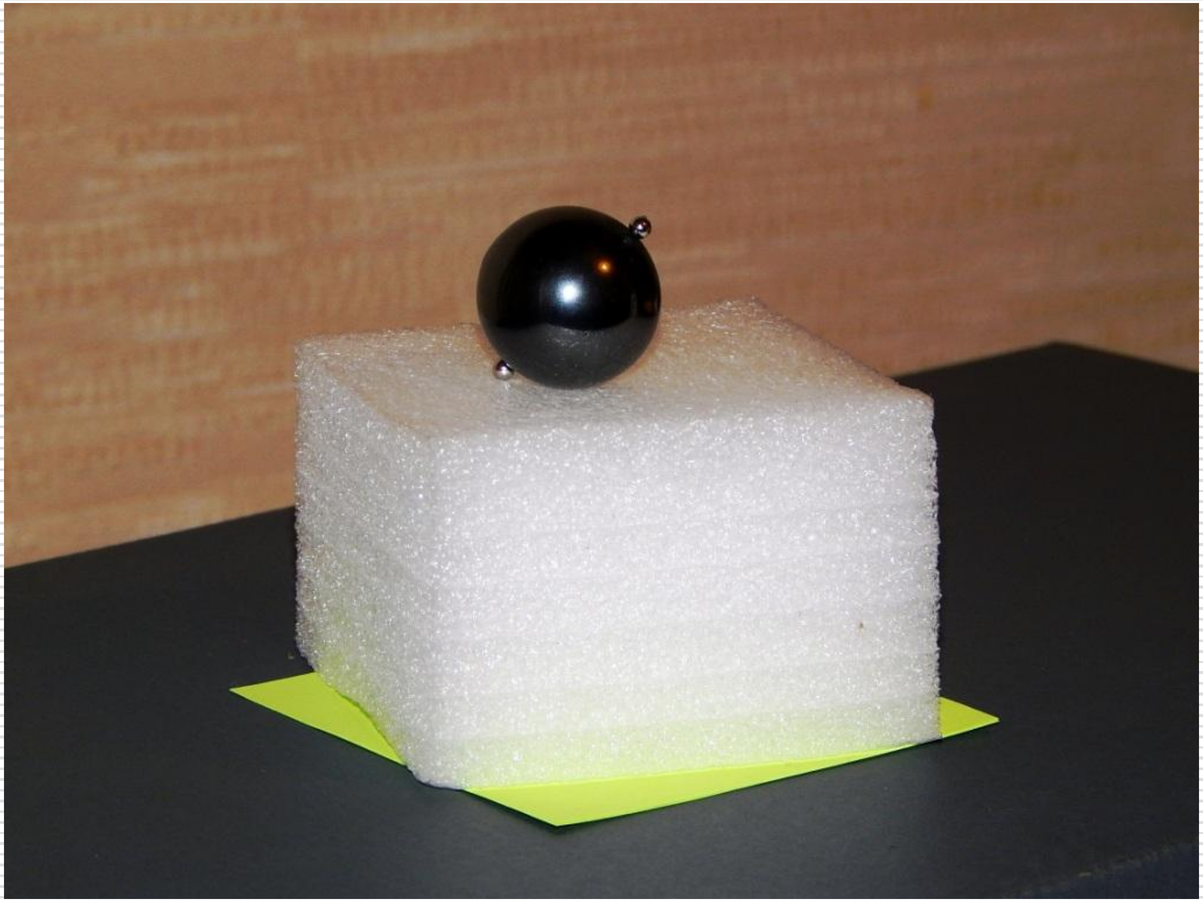
Где север? Где юг?

Как найти полюса шарообразного магнита?

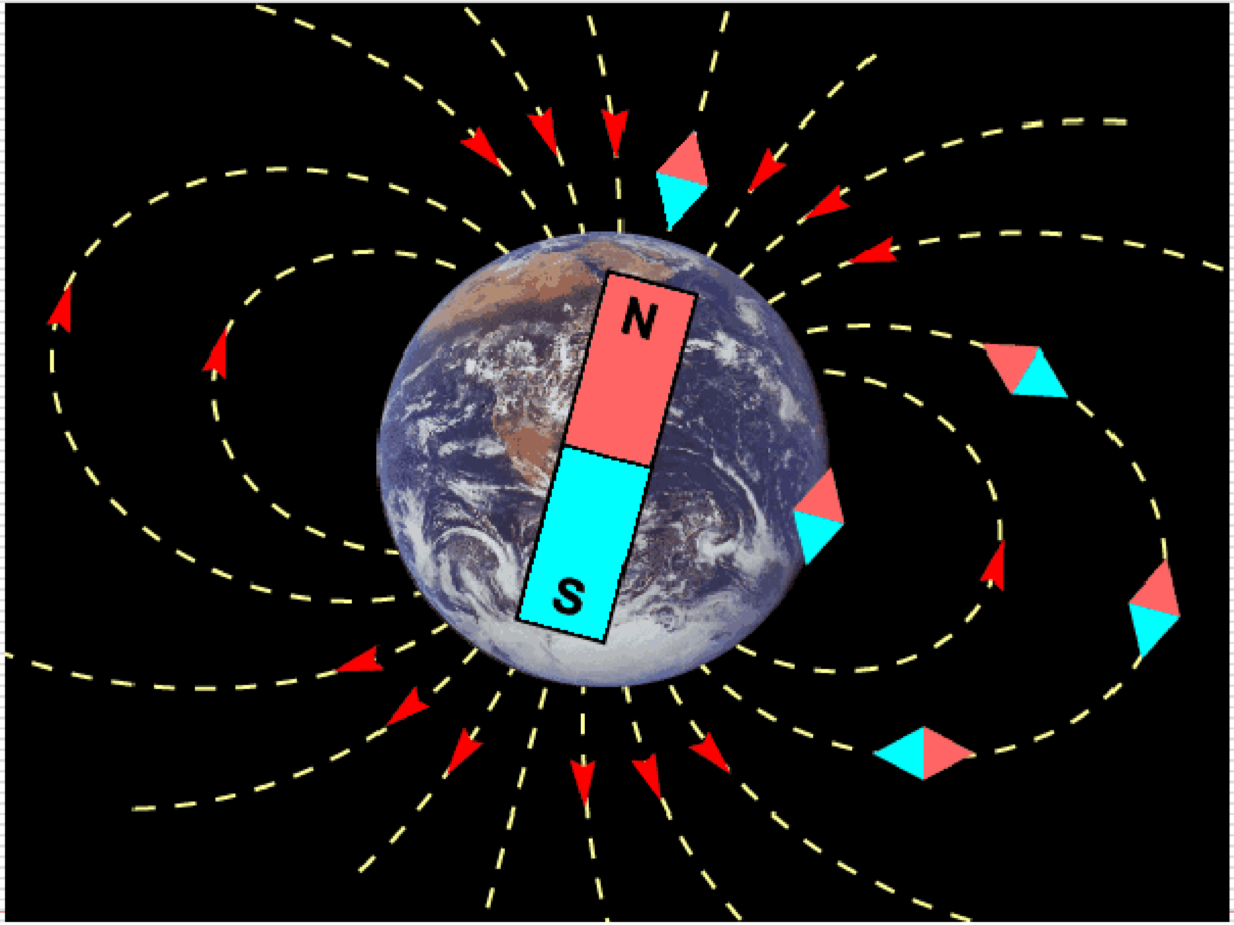
Как определить магнитные полюса шарообразного магнита?

Думаем…

Северный полюс – внизу!



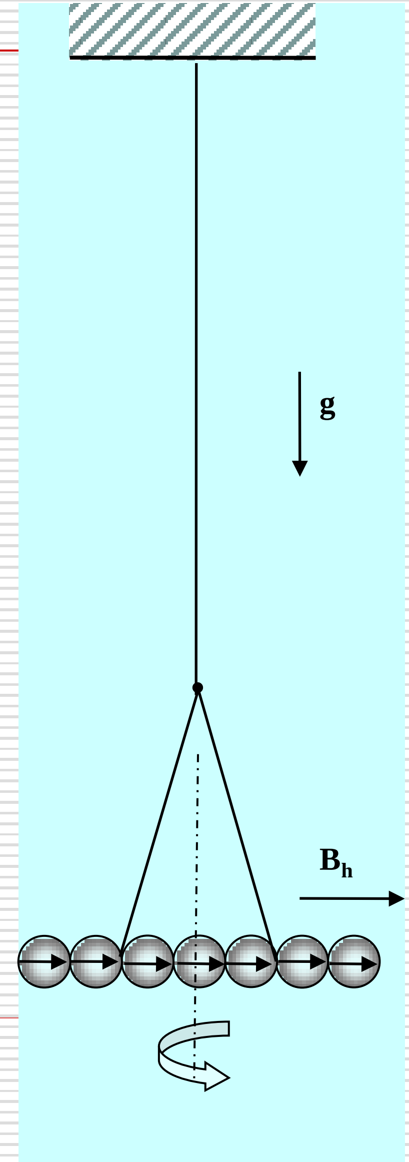
Вот так устроено поле Земли



Лабораторная работа

Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли

- *Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли методом крутильного маятника*



Цель работы

- Определение величины магнитного момента магнитного шарика;
- проверка свойства аддитивности для магнитных моментов;
- определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

Оборудование

- Неодимовые магнитные шары диаметром d_2 = 6 мм (10 штук), набор бумаги для заметок (толщина стопки ~ 30 мм), штатив из немагнитного материала, тонкая нить, штангенциркуль, весы, секундомер.

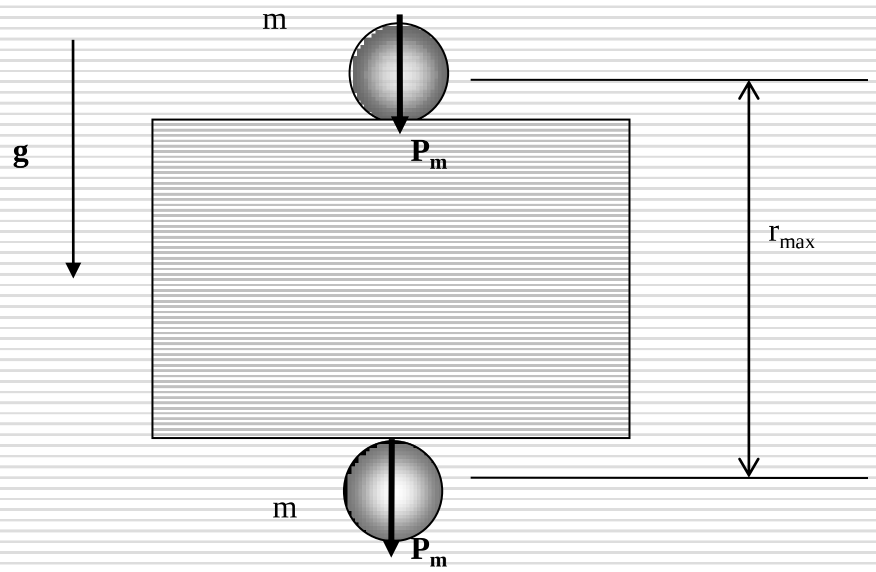
Параметры шаров

Магнитные шарики

- $d = 6$ мм
- $m = 0{,}867$ г
- $P_m = 99{,}6$ мДж/Тл

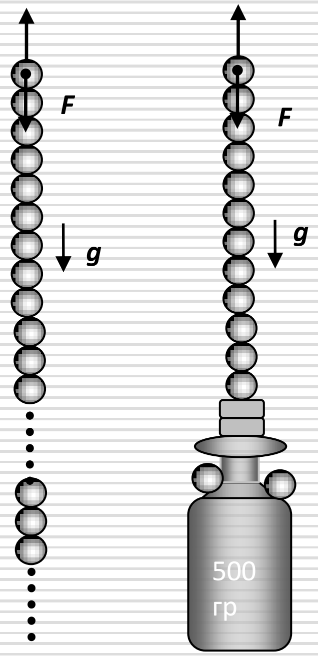
Магнитные моменты шаров

- $(\mu_0/4\pi)\ 6P_m{}^2/r_{max}{}^4 = mg \rightarrow$
  $P_m = \{mgr_{max}{}^4/6(\mu_0/4\pi)\}^{1/2}$



Прочность «магнитной цепочки»

- метод «сцепления»:
  $F_0 = (\mu_0/4\pi)\ 6P_m{}^2/d^4$
  $Mg = F_0(1 + 1/2^4 + 1/3^4 + 1/4^4 + \ldots) \approx 1{,}08F_0$
  Эксперимент:
  $M = 506$ г ⇨
  $F_0 = \mu_0/4\pi\ 6P_m{}^2/d^4 = Mg/1{,}08$ ⇨
  $P_m = d^2\{Mg/1{,}08(\mu_0/4\pi)\}^{1/2} = 99{,}6$ мДж/Тл



а) б)

Рис. 2. Определения магнитного момента шарика по силе сцепления (Метод В).

Период крутильных колебаний

$I_n d^2\varphi/dt^2 = -P_m B_h \varphi \rightarrow$

$I_n \varphi'' + P_m B_h \varphi = 0 \rightarrow$

период колебаний:

$T = 2\pi(I_n/P_n B_h)^{1/2} = 2\pi(I_n/nP_m B_h)^{1/2}$

$I_n \approx 1/12\ M\ell^2 = 1/12\ nm(nd)^2 = n^3 md^2/12$

$T(n) = 2\pi(md^2/12P_m B_h)^{1/2}\ n \rightarrow$

$T = kn,$

$k = 2\pi(md^2/12P_m B_h)^{1/2}$

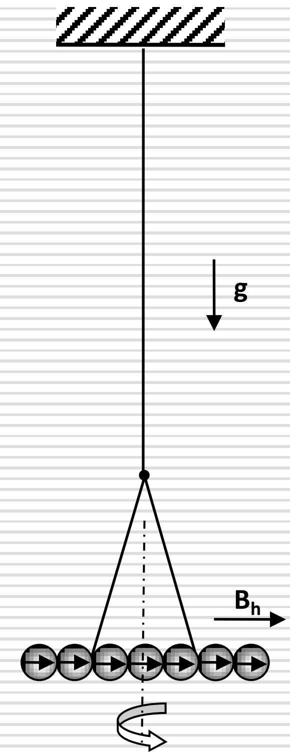


Рис. 3. Крутильный маятник.

Схема установки

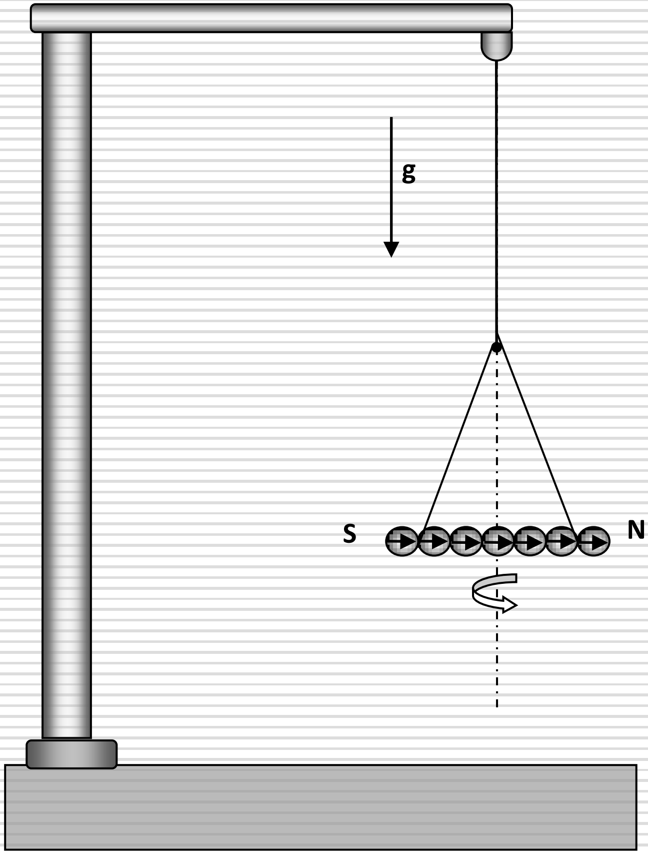


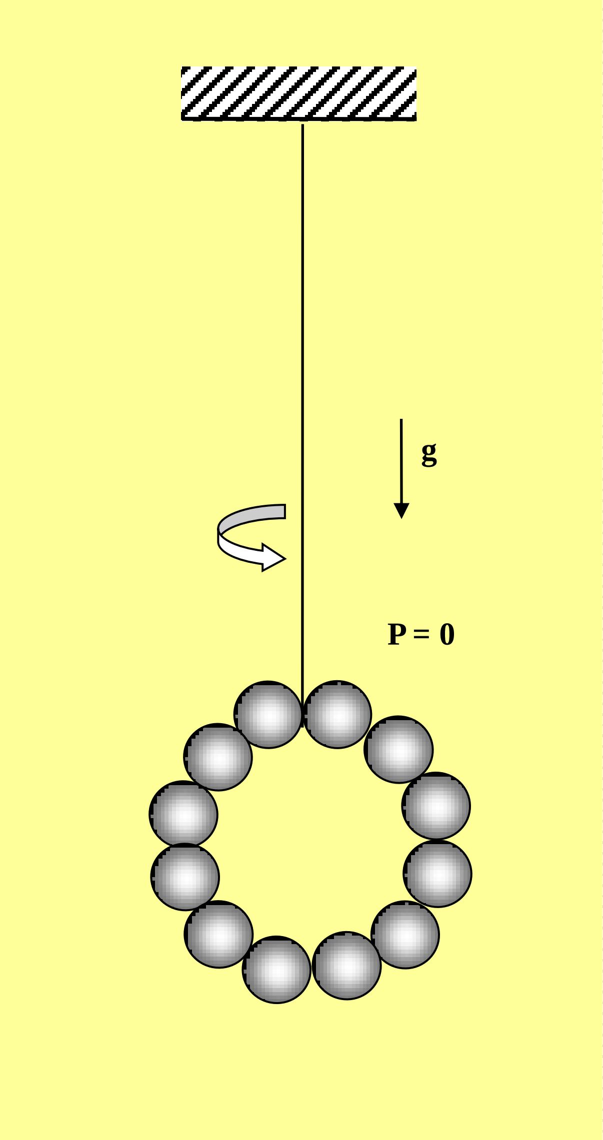
Рис. 5. Схема установки для определения горизонтальной составляющей поля Земли.

Как учесть упругость нити?

Ответ на следующем слайде

Решение

- Колебание системы с P = 0 (см. рис.) ⇨ Результат T = ∞
- Выводы:
  - упругость нити на период колебаний практически не влияет
  - Магнитный момент – величина аддитивная



$$I(n) = 1/12\ md^2\ n^3$$
$$P(n) = P_m n$$

- $I_n = 1/12\ M\ell^2 = 1/12\ nm\ (nd)^2 = 1/12\ md^2\ n^3$

n	I ~	I =	Δ %
3	2,25 md^2	2,30 md^2	2 %
4	5,33 md^2	5,40 md^2	1,3 %
5	10,4 md^2	10,5 md^2	1 %
6	18,0 md^2	18,1 md^2	0,6 %
7	28,6 md^2	28,7 md^2	0,4 %
8	42,67 md^2	42,8 md^2	0,3 %
9	60,75 md^2	60,9 md^2	0,25 %
10	83,33 md^2	83,5 md^2	0,2 %

Зависимость T(n)

№	n	N	t, c	T, c
1	3	150	114,2	0,76
2	4	100	102,6	1,03
3	5	50	63,8	1,28
4	6	50	74,2	1,48
5	7	50	90,0	1,80
6	8	20	41,7	2,09
7	9	20	46,4	2,32
8	10	20	51,1	2,56
9	11	20	55,9	2,80
10	12	20	61,9	3,10

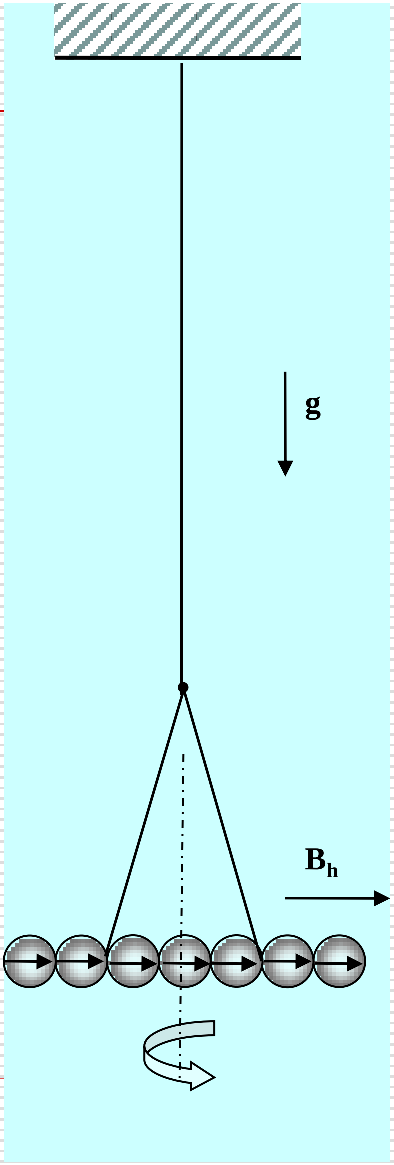
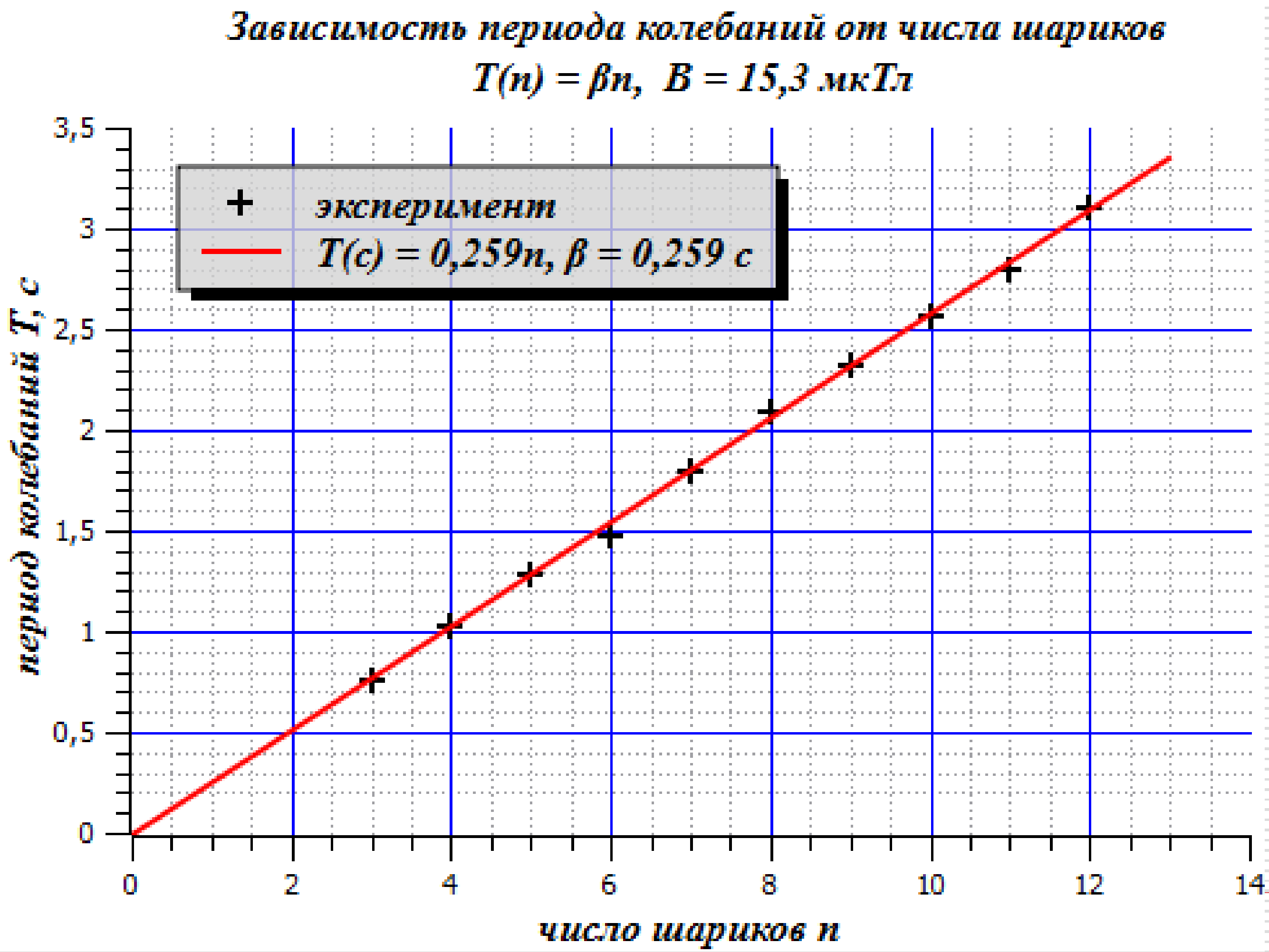


График T(n)


Зависимость периода колебаний от числа шариков
T(n) = βn, B = 15,3 мкТл
эксперимент
T(c) = 0,259n, β = 0,259 c
период колебаний T, c
число шариков n
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
2
4
6
8
10
12
14

Расчёты: $B_h \approx 15{,}3$ мкТл

- $T = 2\pi(md^2/12P_mB_h)^{1/2}\, n = \beta n \Rightarrow$
  $B_h = 4\pi^2 md^2/12P_m\beta^2 \approx 15{,}3$ мкТл

- Табличные значения:
  $B_{табл}(\varphi = 50\text{-}60\ ^0$с.ш.$) = 15$ мкТл
  (Физические величины. Справочник под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, Москва, Энергоатомиздат, 1991 г.)

Лабораторная работа
Вертикальная составляющая магнитного поля Земли

- Определение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли по механическому моменту сил $M = P_m B_\text{v}$

Цель работы

- Определение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли по механическому моменту сил;
- проверка свойства аддитивности для магнитных моментов шариков;
- определение магнитного наклонения.
- Сравнение полученных величин с табличными и расчетными значениями.

Магнитное наклонение

- Магнитное наклонение – это угол β, который вектор ***B*** образует с горизонтальной плоскостью:
  $\mathrm{tg}\beta = B_V/B_h$

Расчётное значение магнитного наклонения

- поле диполя:
  $\mathbf{B} = (\mu_0/4\pi)\,\{3(\mathbf{P}_m\mathbf{r})r/r^5 - \mathbf{P}_m/r^3\}$,
  μ_0 – магнитная постоянная,
  $\mu_0/4\pi = 10^{-7}$ Гн/м.

Расчётное значение магнитного наклонения

- Вертикальная составляющая поля:
  $B_v = 2P_m\cos\theta/R^3$
- горизонтальная составляющая поля: $B_h = P_m\sin\theta/R^3 \rightarrow$
- $tg\beta = B_h/B_v = 2ctg\theta = 2ctg(90^0 + \varphi) = -2tg\varphi$
- для московского региона (φ = 55 – 56^0 с.ш.):
  $\beta = -\,arctg(2tg\varphi) \approx -71^0$

Оборудование

- 10 одинаковых магнитных шариков диаметром d = 6 мм; весы; нитка; проволока; штатив из немагнитного материала; ножницы; линейка.

  магнитный момент одного шарика диаметром 6 мм p_{m} = 99,6 мДж/Тл.

Схема опыта

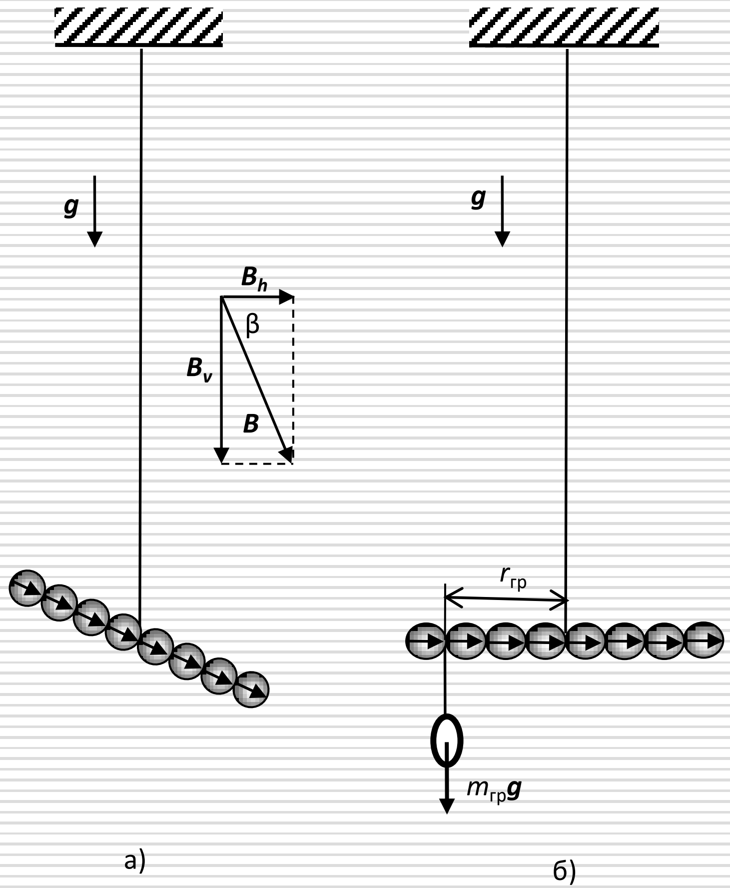
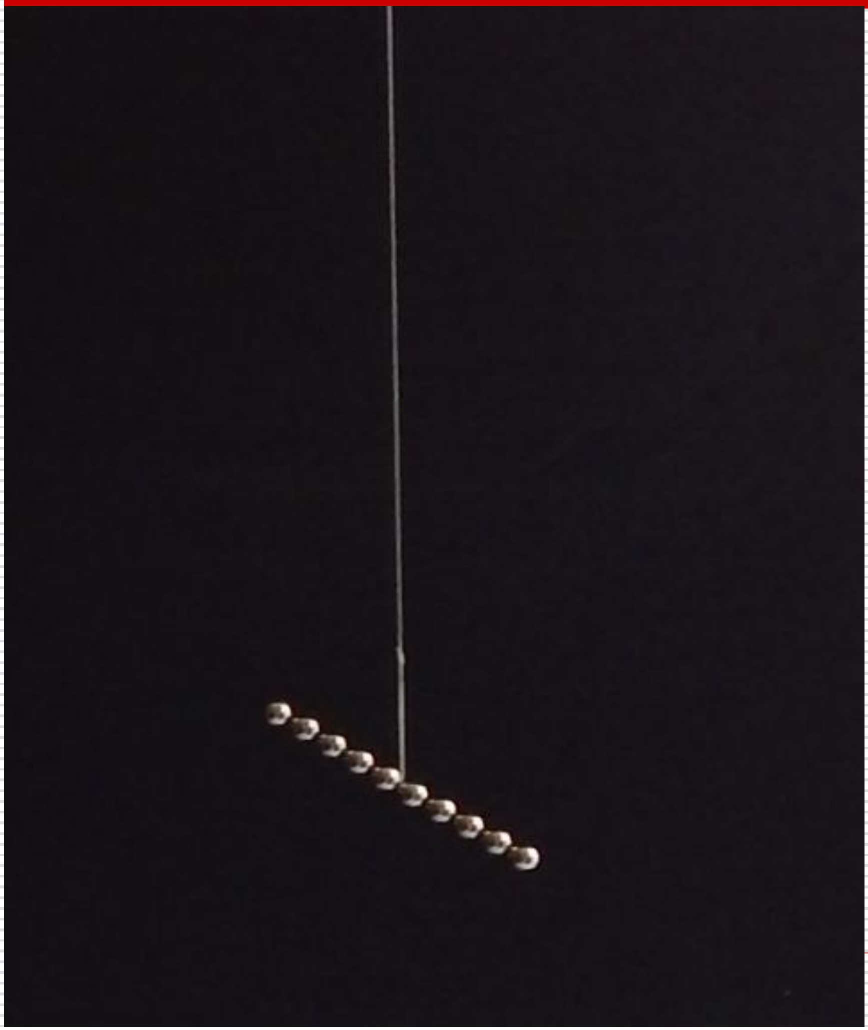
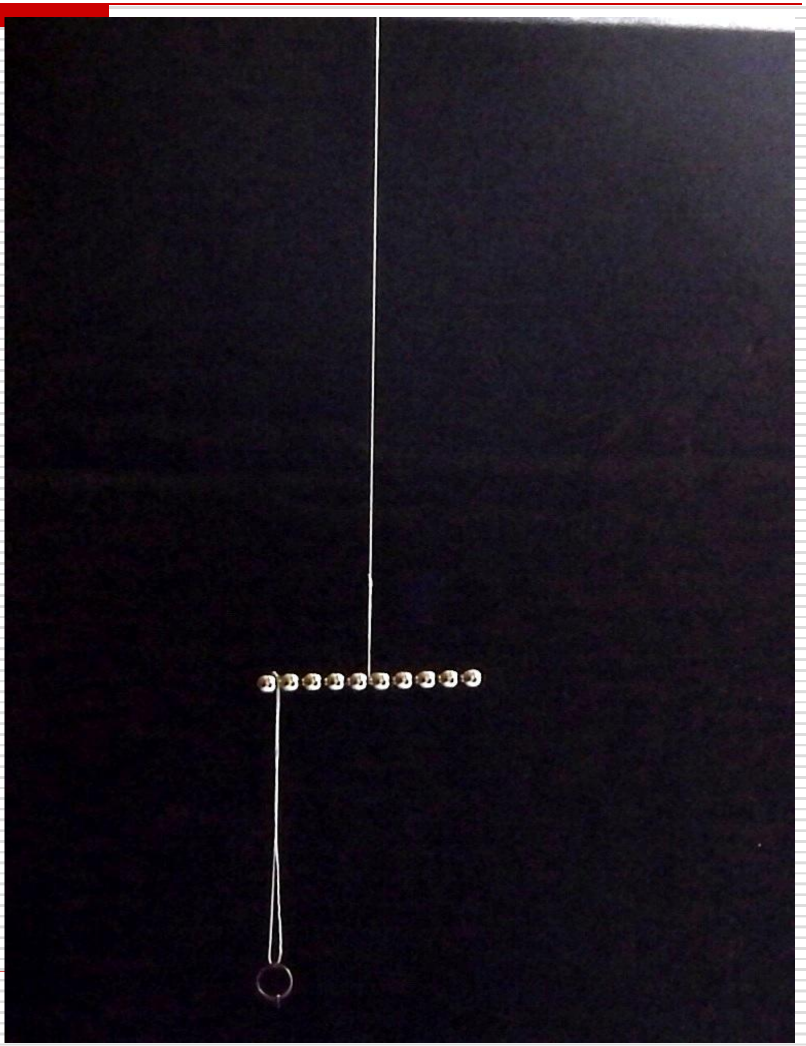


Рис. 4. Определение вертикальной составляющей поля Земли.

Так выглядит реальный опыт





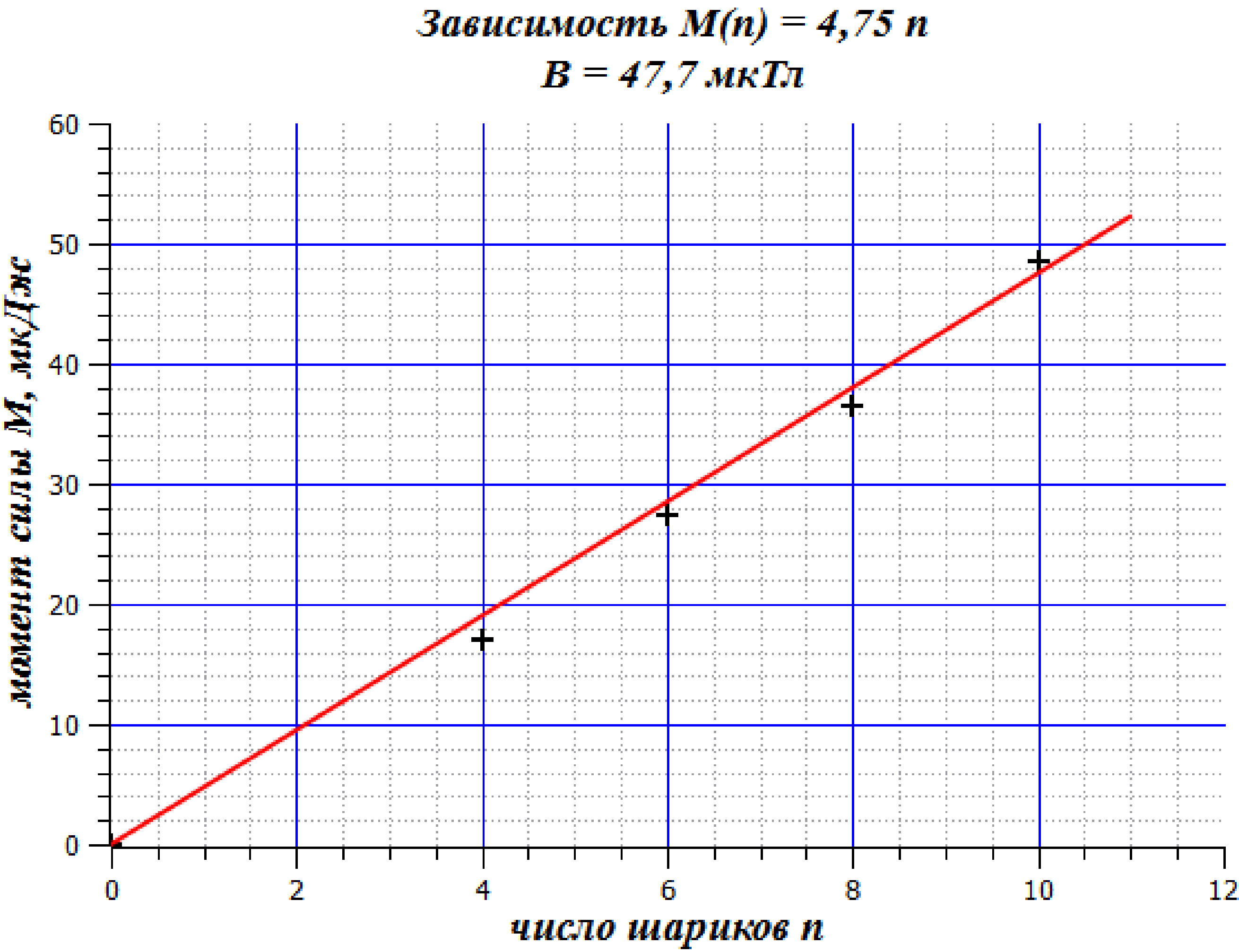
Эксперимент. Зависимость M(n)

d = 6 мм; P_m = 99,6 мДж/Тл					
№	n	ℓ, см	m, мг	r, мм	M, мкДж
1	4	26,0	288,6	6,0	17,0
2	6	21,0	233,1	12,0	27,4
3	8	18,6	206,5	18,0	36,5
4	10	18,6	206,5	24,0	48,6

n – число шариков; ℓ - длина медной проволоки, уравновешивающей «стрелку» из n шариков в горизонтальном положении; $m = \rho_\ell \ell$ – масса проволоки длиной ℓ; r – плечо силы тяжести проволоки m; $M = mgr$ – момент силы тяжести проволоки.

График зависимости $M(n) = np_m B_v = kn$, $k = p_m B_v$

$B_v = k/p_m$



Результаты

- Вертикальная составляющая:
  $B_v = k/P_m = 47{,}7$ мкТл
- Горизонтальная составляющая:
  $B_h = 15{,}3$ мкТл
- Полное поле:
  $B = (B_h^2 + B_v^2)^{1/2} = 50{,}1$ мкТл
- Магнитное наклонение:

  $\beta = \mathrm{arctg}(B_v/B_h) = \mathrm{arctg}(3{,}12) = 72{,}2^0$

ВСЁ.
СПАСИБО