

## Задача 9-1. Бегающий зайчик

**Приборы и оборудование:** крутильный маятник, секундомер, лазер, плоское зеркало, угломерная шкала, линейка 40 см.

Крутильный маятник состоит из деревянной линейки (1), к концам которой с помощью скотча прикреплены два одинаковых груза (2). Линейка с помощью двух нитей (3) подвязана к лапке штатива (4). Длина нитей должна быть не менее 50 см, расстояние между нитями не более 1 см, нити должны быть параллельны. С помощью кусочка пластилина к середине линейки прикреплено плоское стеклышко, играющее роль зеркала.

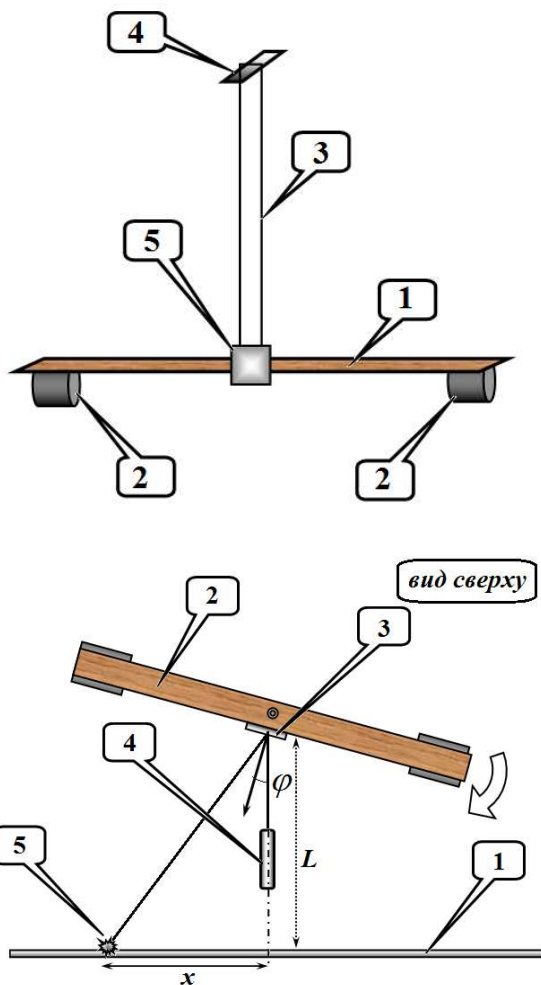
В работе вам предстоит исследовать крутильные колебания этого маятника вокруг вертикальной оси.

Для этого соберите следующую установку. К торцу стола прикреплена полоска картона (1), играющая роль экрана со шкалой (разметить ее необходимо самостоятельно). Расположите штатив с маятником так, чтобы в положении равновесия линейка (2) располагалась параллельно экрану. Расстояние от зеркальца маятника до экрана должно быть равно  $L = 20 \text{ см}$ . Поместите лазер (4) между экраном и зеркальцем так, чтобы его луч падал на зеркальце нормально (т.е. перпендикулярно), когда маятник находится в положении равновесия. При повороте маятника отраженный от зеркальца луч («зайчик» 5) должен двигаться вдоль шкалы. При необходимости отрегулируйте ориентацию зеркальца так, чтобы отраженный луч не перекрывался лазером и был хорошо виден на экране. Координату «зайчика» на экране будем обозначать  $x$ . Начало отчета совмещено с положением «зайчика» в положении равновесия. Угол поворота линейки обозначим  $\varphi$  и так же будем его отсчитывать от положения равновесия. Таким образом, при колебаниях маятника, как координата «зайчика»  $x$  (в сантиметрах), так и угол поворота  $\varphi$  (в градусах) должны изменяться в симметричных пределах  $\pm x_0$ ,  $\pm \varphi_0$ , где  $x_0, \varphi_0$  - максимальные отклонения координаты и угла поворота, соответственно.

**Помните! При оптических измерениях самой важное – точная настройка установки!**

### Часть 1. Градуировка шкалы.

Данный крутильный маятник очень чувствителен, поэтому градуировать шкалу с его помощью очень сложно. Для облегчения выполнения этой важной части работы вам предоставлено плоское зеркало. Вместо маятника расположите зеркало в том же месте, где будет находиться зеркальце маятника. Поставьте зеркало на лист бумаги с угломерной шкалой, для измерения угла поворота зеркала. Радиальные линии проведены через  $5^\circ$ .



- 1.1 Проградуируйте шкалу экрана для измерения координаты зайчика  $x$  в сантиметрах.
- 1.2 Измерьте зависимость координаты зайчика  $x$  от угла поворота зеркала  $\varphi$  (в градусах).  
Постройте график полученной зависимости.
- 1.3 Получите теоретическую формулу для зависимости  $x(\varphi)$ , постройте ее график.  
Сравните экспериментальную и теоретическую зависимости. Укажите возможные причины их расхождения.
- 1.4 Постройте на экране вторую шкалу, для измерения угла поворота зеркала (эта шкала будет неравномерной).

***Построение шкал оценивается!***

## **Часть 2. Средняя скорость.**

Поворот маятника и движения зайчика не являются равномерными, поэтому изменения этих величин можно характеризовать средней скоростью движения «зайчика»  $v_{\text{ср.}}$  и средней угловой скоростью  $\omega_{\text{ср.}}$ .

Линейную скорость следует измерять в  $\frac{\text{см}}{\text{с}}$ , а угловую в  $\frac{\text{град}}{\text{с}}$ .

2.1 Измерьте зависимость средней угловой скорости вращения маятника  $\omega_{\text{ср.}}$  от максимального угла поворота  $\varphi_0$  за половину периода колебаний при изменении угла поворота от  $-\varphi_0$  до  $+\varphi_0$ . Постройте график полученной зависимости.

2.2 Покажите, что измеренная средняя угловая скорость  $\omega_{\text{ср.}}$  пропорциональна максимальному углу поворота  $\varphi_0$

$$\omega_{\text{ср.}} = C \varphi_0, \quad (1)$$

Определите коэффициент  $C$ , укажите его физический смысл.

*Приведите все, использованные вами расчетные формулы, а также укажите все величины, которые вам необходимо измерять.*

## **Часть 3. Закон движения.**

В этой части вам необходимо экспериментально исследовать закон изменения угла поворота маятника от времени.

3.1 Измерьте зависимость угла поворота маятника от времени  $\varphi(t)$  за половину периода колебаний, т.е. при изменении угла поворота от  $-\varphi_0$  до  $+\varphi_0$ . Постройте график полученной зависимости.

3.2 Используя полученный график, определите максимальную мгновенную угловую скорость вращения маятника. Найдите ее отношение к средней скорости на всем интервале от  $-\varphi_0$  до  $+\varphi_0$ .

3.3 Используя результаты проведенных измерений, постройте на одном бланке графики зависимостей  $\frac{\varphi}{\varphi_0}$  и  $\frac{x}{x_0}$  от времени. Объясните различие между полученными зависимостями.

*Измерения проведите при максимальном угле поворота  $\varphi_0 = 30^\circ$ . Используйте память этапов секундомера – прочитайте инструкцию по его использованию. Кратко опишите, как вы проводили измерения.*

## Задача 9.2 Изучение термопары.

**Приборы и материалы:** мультиметр с термопарой, переменный резистор сопротивлением 100 Ом, соединительные провода, алюминиевый стакан, спиртовка, вода, лед.

Для измерения температуры в современных мультиметрах используется термопара. Термопара устроена очень просто: последовательно спаяны три куска проволоки, причем крайние проволоки изготовлены из одного материала, центральная из другого. Если места спаев поддерживать при разных температурах, то на концах термопары возникает постоянное напряжение<sup>1</sup>, пропорциональное разности температур спаев. В предоставленном оборудовании один из спаев находится внутри прибора.

Вам предстоит с помощью мультиметра измерять температуру, напряжение и электрическое сопротивление – внимательно ознакомьтесь с инструкцией по пользованию мультиметра.

### Часть 1. Ознакомление с работой мультиметра.

Измерьте с помощью мультиметра: температуру, электрическое сопротивление термопары, напряжение на концах термопары при температуре таящего льда, комнатной температуре и температуре кипящей воды.

Результаты измерений занесите в таблицу. Не забудьте указать единицы измерения.

Условия	Истинная температура	Температура (измеренная)	Сопротивление	Напряжение
Тающий лед				
Комнатная температура				
Кипящая вода				

### Часть 2. Термопара, как источник электроэнергии.

Соедините последовательно термопару, переменный резистор и выключатель. Термопару поместите в сосуд с кипящей водой. Мультиметр подключите к цепи, таким образом, чтобы можно было измерять сопротивление переменного резистора и напряжение на нем.

С выводами переменного резистора разберитесь самостоятельно: из трех клемм вам необходимо выбрать две, таким образом, чтобы сопротивление между ними изменялось при повороте ручки резистора.

2.1 На рисунке укажите к каким клеммам вы подключали переменный резистор.

2.2 Приведите электрическую схему, использованную вами для измерений сопротивления и напряжения. Кратко опишите, как вы проводили измерения.

*Опустите термопару в кипящую воду. Спиртовку поджигайте только во время проведения измерений. Все измерения проводите при кипящей воде.*

2.3 Проведите измерения зависимости напряжения на резисторе от его сопротивления.

---

<sup>1</sup> Точнее ЭДС.

2.4 Для каждого значения сопротивления резистора рассчитайте значения силы тока и мощности, выделяющейся на резисторе.

*Не забудьте привести формулы, по которым вы проводили расчеты.*

2.5 Постройте график зависимости напряжения на резисторе от силы тока через него.

Качественно объясните полученную зависимость. Выделите диапазон, в котором данная зависимость может быть приближена линейной зависимостью. Используя этот участок, определите сопротивление термопары.

2.6 Постройте график зависимости мощности, выделяющейся на резисторе от его сопротивления. Качественно объясните полученную зависимость.

Укажите, при каком сопротивлении резистора, эта мощность максимальна. Чему равна эта мощность? Чему равна стоимость электроэнергии (в белорусских рублях), полученной с помощью такого прибора в течении года?

*Считайте, что 1 киловатт-час стоит 200 рублей.*

## Задача 10-1 Терморезистор

**Приборы и оборудование:** терморезистор, термометр, мультиметр, секундомер, штатив, горячая и холодная вода в стаканах, алюминиевый цилиндр.

Терморезистор – полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого зависит от температуры. Электрическое сопротивление можно измерять с помощью мультиметра, работающего в режиме омметра (ознакомьтесь с инструкцией).

**Вам предстоит измерять сопротивление терморезистора, опущенного в воду – следите, чтобы отводящие контакты находились выше уровня воды!**

### Часть 1. Градуировка терморезистора.

Поместите терморезистор в сосуд, в который будете наливать воду. Также поместите в этот же сосуд термометр для измерения температуры, термометр закрепите в лапке штатива.

1.1 Измерьте зависимость сопротивления терморезистора от температуры. Постройте график полученной зависимости. Для ускорения процесса измерений вы можете смешивать холодную горячую воду.

#### Физическая подсказка.

Ознакомьтесь с краткой выдержкой из книги

Мэклин Э. Д.  
М15 Терморезисторы: Пер. с англ./Под общей редакцией  
К. И. Мартюшова. — М.: Радио и связь, 1983. — 208 с.,  
ил.  
95 к.

Чтобы электрон мог преодолеть воздействие положительного заряда, окружающего ион, например  $Fe^{3+}$ , он должен обладать определенной минимальной энергией. Общее число электронов, участвующих в проводимости, будет зависеть от числа имеющихся электронов, энергия которых превышает некоторую минимальную энергию переноса. Так как энергия электронов прежде всего определяется температурой материала, то энергия, а также число свободных электронов возрастают с ростом температуры. Эта минимальная энергия переноса называется *энергией активации* процесса прыжковой проводимости, и электропроводность  $\sigma$  находится из уравнения

$$\sigma = \sigma_0 \exp \frac{-\Delta E}{2 k T}, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_0$  — проводимость при  $T \rightarrow \infty$ , которая определяется полным числом электронов, способных участвовать в процессе проводимости.

В приведенной формуле (1.1)  $\Delta E$  - энергия активации,  $T$  - абсолютная температура,

$k = 1,380 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$  - постоянная Больцмана.

1.2 Используя эту цитату, покажите, что приведенная формула применима к выданному вам терморезистору<sup>2</sup>.

1.3 Рассчитайте энергию активации (в электрон-вольтах) электронов терморезистора. Не забудьте про оценку погрешности. Заряд электрона  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} Кл$ .

<sup>2</sup> Если вас сильно испугала эта цитата, и вы страшно боитесь экспоненциальной функции, то п.1.2 и 1.3 лучше пропустите, приступайте к выполнению Части 2. Результаты то п.1.2 и 1.3 в ней не используются.

### Математическая подсказка.

В физике широко используется экспоненциальная функция  $\exp(x) = e^x$  - обычная показательная функция, основанием которой служит число  $e = 2,71828\dots$  (не путайте с зарядом электрона)

Обратной к ней является логарифмическая функция  $\ln x$ . Причем  $\ln(\exp(x)) = x$ . Кроме того, логарифм произведения равен сумме логарифмов  $\ln(x \cdot y) = \ln x + \ln y$ . Наконец, у вас есть калькулятор для расчета этих функций!

## **Часть 2. Измерение теплоемкости.**

**В этой части работы все измерения проводите с помощью терморезистора.**

Для измерения времени используйте секундомер – удобно использовать память этапов. В выданном вам стакане на внутренней стороне нанесены две метки. Нижней отметке соответствует объем воды 60 мл, верхней – 80 мл. Объем алюминиевого цилиндра 20 см<sup>3</sup>.

2.1 В сосуд залейте 80 мл горячей воды. Измерьте зависимость температуры воды от времени в процессе остывания в диапазоне температур от 80°C до 50°C. Постройте график полученной зависимости.

### Методическая подсказка.

Процесс измерения удобно проводить следующим образом. Заранее приготовить таблицу, в первую колонку которой следует занести значения температур (в этом пункте достаточно с интервалом в 5°C). Во вторую колонку следует занести соответствующие значения сопротивлений терморезистора, используя свои результаты первой части. Затем в сосуд залить горячую воду, когда ее температура опустится до 80°C, пустить секундомер, далее в процессе остывания фиксировать времена, когда температура достигает очередного фиксируемого значения (можно использовать память секундомера)

2.2 Мощность теплоотдачи в окружающую среду, можно считать линейной функцией от температуры воды  $t$

$$P = \frac{\delta Q}{\Delta \tau} = At + B. \quad (2)$$

Здесь  $\delta Q$  - количество теплоты, отданное водой за малый промежуток времени  $\Delta \tau$ ,  $A$  - коэффициент теплоотдачи,  $B$  - некоторый постоянный параметр.

Используя результаты измерений в п.2.1 постройте график зависимости мощности теплоотдачи от температуры воды. Определите средние значения коэффициента теплоотдачи  $A$  и параметра  $B$ .

Подсказка. В при изменении температуры на 5°C можно пренебречь изменением мощности теплоотдачи. Удельная теплоемкость воды  $c = 4,2 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$ .

2.3 Измерьте процесс остывания воды, в который опущен алюминиевый цилиндр, изначально находящийся при комнатной температуре. Для этого в сосуд залейте 60 мл горячей воды, когда ее температура опустится до 80°C опустите в нее цилиндр<sup>4</sup> (при

<sup>3</sup> Во избежание путаницы в данной работе температуры обозначаются буквой  $t$ , а времена -  $\tau$ .

<sup>4</sup> Когда цилиндр погрузится в воду, суммарный объем станет равным 80 мл, поэтому можно считать, что найденные параметры зависимости (2) останутся прежними.

комнатной температуре) и одновременно пустите секундомер. Постройте график зависимости температуры воды в диапазоне от  $80^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$  от времени в этом случае (на том же бланке, что и график в п.2.1)

2.4 В каждом из интервалов температур рассчитайте (не забудьте привести расчетные формулы):

$\delta Q_0$  - количество теплоты, отданное водой;

$\delta Q_1$  - количество теплоты, отданное в окружающую среду;

$\delta Q_2$  - количество теплоты, полученной цилиндром (эти величины могут быть отрицательными).

*Для расчета величин  $\delta Q_1$  предпочтительнее использовать формулу (2) и найденное среднее значение коэффициента теплоотдачи.*

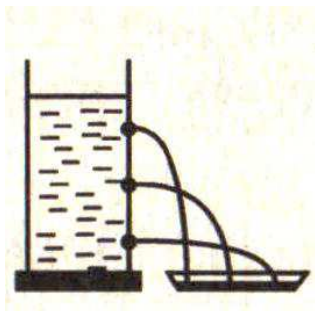
2.5 Постройте график зависимости теплоты  $Q_2$ , полученной цилиндром от температуры воды. Качественно объясните полученную зависимость.

2.6 Используя полученные данные, оцените теплоемкость цилиндра.

*Оценивать погрешность в данном пункте не требуется.*

## Задача 10-2 Струя из бутылки.

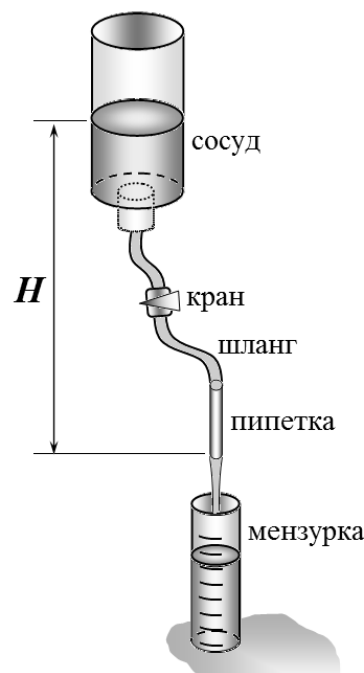
**Приборы и оборудование:** бутылка с водой, капельница одноразовая, штатив с лапками, секундомер, мензурка, линейка 40 см, стакан, пластиковый желоб.



*Из одного учебника в другой кочует рисунок, иллюстрирующий формулу Торричелли. Ваша задача доказать, что его нарисовал человек, не только не знающий физики, но и никогда не проводивший данный эксперимент!*

В вашем распоряжении имеется следующая установка:

перевернутая пластиковая бутылка (сосуд) с водой, в крышку бутылки вставлен пластиковый шланг с краном, на конце шланга закреплена стеклянная пипетка, струя из пипетки может попадать в мензурку. Вся система крепится на штативе (на рисунке не показан).



### Часть 1.

1.1 Обозначим скорость воды в струе на выходе из пипетки  $v_0$ , радиус отверстия пипетки  $r$ . Запишите формулу для расхода воды  $q$  (объема воды, вытекающей в единицу времени  $q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ ), вытекающей из пипетки.

1.2 Измерьте зависимость расхода воды  $q$  от гидравлического напора воды  $H$  (высоты между нижним краем пипетки и верхним уровнем воды в сосуде). Постройте график полученной зависимости.

*При измерениях кран держите полностью открытым, поддерживайте постоянным уровень воды в сосуде, регулярно подливая воду в сосуд.*

1.3 Скорость вытекания воды зависит от высоты  $H$ , эта зависимость может быть выражена формулой

$$v_0 = CH^\gamma, \quad (1)$$

где  $C$  - постоянный коэффициент, зависящий от параметров установки.

На основании результатов ваших измерений определите показатель степени<sup>5</sup>  $\gamma$ , при котором формула (1) наиболее точно описывает результаты ваших измерений.

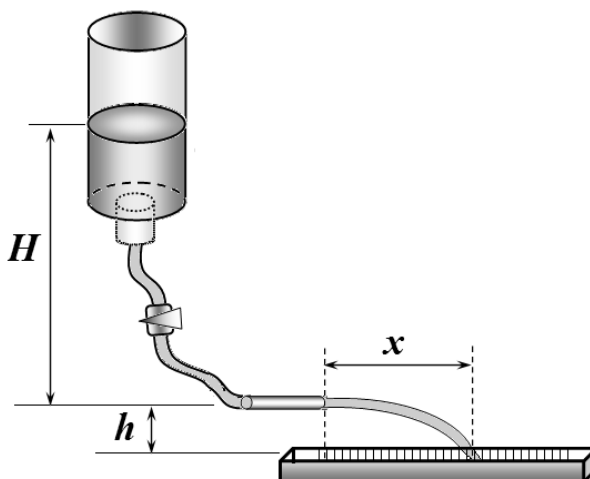
*При необходимости выделите и укажите диапазон высот, в котором формула (1) с найденным показателем степени применима.*

<sup>5</sup> Для повышения вашей эрудиции отметим, что при  $\gamma = 0,5$  формула (1) носит имя Торричелли, а при  $\gamma = 1$  - Пуазейля.



## Часть 2.

Закрепите пипетку горизонтально. Под струю подставьте пластиковый желоб, вода из которого должна стекать в сливной сосуд. Для этого желоб слегка наклоните. В данной части вам необходимо измерять дальность полета струи  $x$ . Для этого на дно желоба положите пластиковую линейку.



**2.1 (Теоретическая задача)** Выразите дальность полета струи  $x$  через начальную скорость воды в струе  $v_0$  (на выходе из пипетки) и высоту пипетки над срезом желоба  $h$ . Сопротивлением воздуха можно пренебречь.

**2.2** Измерьте зависимость длины струи  $x$  от гидравлического напора воды  $H$ . Измерения проведите для двух значений высоты пипетки  $h \approx 7$  см и  $h \approx 15$  см. Постройте графики полученных зависимостей.

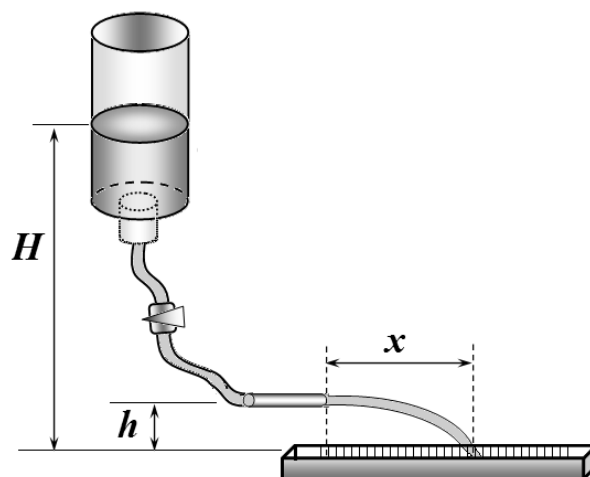
*На бутылку прикреплена полоска миллиметровой бумаги, которую следует использовать в качестве шкалы. Величина  $H$  изменяется из-за того, что вода вытекает из бутылки. Старайтесь поменьше пользоваться краном на шланге. Для получения нужной зависимости достаточно провести измерения при двух положениях бутылки. Не стремитесь достичь больших значений  $H$  - при этом струя разбивается на капли. вполне достаточно ограничиться диапазоном  $H < 30$  см.*

**2.3** Еще раз проверьте выполнимость формулы (1). Укажите причины, по которым расчеты по эти формулам не соответствуют результатам вашего эксперимента. Выберите диапазон изменения  $H$ , в котором исследуемая зависимость является линейной, оцените параметры этих зависимостей для двух значений  $h$ .

## Часть 3.

**3.1** Найдите отличие рисунка данной части, от рисунка, приведенного в части 2.

**3.2** Оставляя высоту  $H$  неизменной, измерьте зависимость дальности полета струи от высоты  $h$ . Измерения проведите для одного значения  $H$  (выберите его самостоятельно и не забудьте указать его в своей тетради). Постройте график полученной зависимости.



**3.3** Укажите, при каком отношении  $\frac{h}{H}$  дальность струи максимальна.

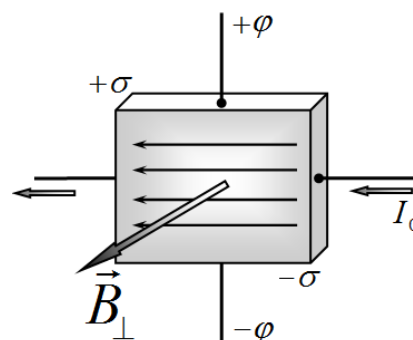
**3.4** Исправьте рисунок, послуживший основой идеи данной задачи - нарисуйте правильный рисунок, соответствующий результатам ваших экспериментов.

## Задача 11-1 Намагниченный гвоздь

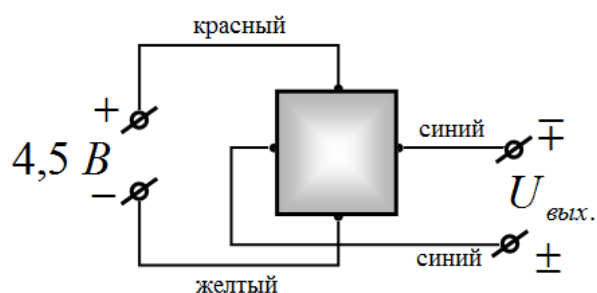
Для измерения индукции магнитного поля широко используются датчики Холла. Принцип работы этих приборов основан на эффекте, открытом американским физиком Эдвином Холлом в 1879 г и названным его именем.

Кратко поясним суть этого эффекта. Пусть прямоугольная проводящая пластинка находится в магнитном поле.

При пропускании электрического тока вдоль пластинки на движущиеся заряды будет действовать сила Лоренца, обусловленной нормальной составляющей вектора индукции  $\vec{B}_\perp$ . Эта сила приведет к смещению траекторий частиц к торцам пластинки и возникновению на них поверхностных электрических зарядов  $\pm\sigma$ . В стационарном режиме электрическое поле, созданное этими зарядами будет компенсировать действие силы Лоренца. Таким образом, между торцами пластинки возникнет ЭДС Холла. Величина этой ЭДС (которую будем называть выходным напряжением, и обозначать  $U_{\text{вых.}}$ ) пропорциональна силе тока в пластинке и нормальной составляющей индукции магнитного поля. При изменении направления вектора индукции изменяется знак выходного напряжения. Коэффициент пропорциональности зависит от свойств пластинки – материала и геометрических размеров. Если силу тока в пластинке поддерживать постоянной, то выходное напряжение  $U_{\text{вых.}}$  оказывается пропорциональным нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля.



Предоставленный вам датчик Холла представляет собой именно такую пластинку размером приблизительно  $1\text{ мм} \times 2\text{ мм}$  с четырьмя цветными выводами, прикрепленными к торцам пластинки: красный и желтый для создания тока в датчике (их следует подключать к батарее питания – следите за полярностью подключения!); два желтых для измерения выходного напряжения (их следует подключать к мультиметру). Мультиметр должен работать в режиме измерения напряжения в диапазоне 200 мВ.



Датчик Холла подготовлен для градуировки и проведения измерений в картонной упаковке (на самом краю картонки темная маленькая пластинка, обжатая скотчем – это и есть датчик Холла).

Даже в отсутствии внешнего магнитного поля при подключении источника питания к датчику, милливольтметр фиксирует некоторое фоновое напряжение  $U_\phi$ , которое несколько меняется при различной ориентации датчика. Это фоновое напряжение (от десятых долей милливольт до нескольких милливольт) обусловлено технологическими особенностями изготовления датчиков. Расположение вблизи металлических предметов (например, штатива), влияние магнитного поля Земли изменяет значение «фоновое напряжение», так как появляется внешнее магнитное поле.

Представьте, что у линейки нет четкого начала отсчета, да к тому же это начало смещается то в сторону увеличения, то в сторону уменьшения! Вот такой чудесный (без нуля) и очень чувствительный измерительный прибор в ваших руках...

**Приборы и материалы:** датчик Холла с выводами проводов, мультиметр, две батарейки 4,5 В, ключ электрический, реостат 15 Ом, соединительные провода, амперметр школьный на 2 А, соленоид с известными параметрами, кусок гвоздя длиной 5,5 см и диаметром примерно 4 мм, пластилин для изготовления держателей.

Картонную пластинку с датчиком Холла закрепите вертикально на столе на куске пластилина и не смещайте его во время выполнения всех заданий. Подносите приборы к датчику, а не датчик к приборам! Держите подальше от датчика все железные (ключи, ручки ...) и никелевые (например, монеты) предметы. Соберите электрическую цепь датчика: источник питания и мультиметр. Постарайтесь не смещать датчик и измерительную цепь.

### Часть 1. Градуировка датчика (или изготовление теслометра).

Поднесите соленоид торцом к датчику Холла. Ось соленоида должна быть перпендикулярна плоскости датчика и проходит через его середину. Используйте пластилин для надежного крепления соленоида. Соберите электрическую цепь из последовательно соединенных батарейки, электрического ключа, соленоида, переменного резистора и амперметра.

**Обязательно включите в цепь электрический ключ. Во избежание быстрой разрядки батарейки подключайте ее к цепи только во время измерений!**

1.1 Приведите полную электрическую схему, использованную вами для измерений.

*Магнитное поле на торце соленоида рассчитывается по формуле:*

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{\sqrt{d^2 + 4L^2}} = AI, \quad (1)$$

где  $d = 1,3 \text{ см}$  - диаметр соленоида,  $L = 4,0 \text{ см}$  - его длина,  $N = 100$  - число витков обмотки соленоида,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  - магнитная постоянная;  $I$  - сила тока через соленоид;  $A$  - постоянная соленоида (рекомендуем сразу рассчитать ее численное значение).

1.2 Проведите измерения зависимости ЭДС Холла ( $U_{\text{вых.}}$ ) от индукции магнитного поля на торце соленоида  $B_0$ .

**Не забудьте измерить и учесть фоновое напряжение  $U_{\phi}$ .**

1.3 Постройте график зависимости<sup>6</sup> индукции поля  $B_0$  от выходного напряжения  $U_{\text{вых.}}$ .

1.4 Обоснуйте, можно ли считать полученную зависимость прямо пропорциональной. Рассчитайте постоянную (чувствительность) вашего датчика

$$K = \frac{B_0}{U_{\text{вых.}}} \left( \frac{\text{мТл}}{\text{мВ}} \right).$$

В дальнейшем считайте эту величину неизменной и используйте ее для расчета индукции магнитного поля.

---

<sup>6</sup> Конечно, с точки зрения физики выходное напряжение зависит от индукции поля! Но воспримите задания в математическом смысле: постройте обратную функцию.

## Часть 2. Магнитные свойства гвоздя.

Не разбирая установки, аккуратно вставьте гвоздь в соленоид.

Вам необходимо исследовать зависимость индукции магнитного поля, создаваемого гвоздем<sup>7</sup>  $B_1$ , от величины индукции магнитного поля, создаваемого током в соленоиде  $B_0$ .

Магнитное поле гвоздя сложным образом зависит от внешнего магнитного поля, создаваемого соленоидом. Поэтому при проведении измерений изменяйте силу тока монотонно: монотонно увеличивайте и монотонно уменьшайте.

«Потренируйте» три раза гвоздь в магнитном поле, увеличивая силу тока до 1 А и потом уменьшая ее до минимума.

2.1 Исследуйте зависимость индукции магнитного поля  $B_1$ , создаваемого гвоздем, от индукции магнитного поля  $B_0$ , создаваемого соленоидом.

*Не забудьте измерить и учесть фоновое напряжение  $U_{\phi}$ .*

Понятно, что непосредственно можно измерить только индукцию суммарного поля  $B = B_1 + B_0$ . Но индукцию магнитного поля соленоида  $B_0$  вы можете рассчитать. Измерение рекомендуем проводить в следующей последовательности. Установите ток через соленоид +1 А и уменьшайте ток до нуля, затем поменяйте направление тока и изменяйте его от нуля до -1 А, снова изменяйте значение силы тока от -1 А до нуля и, наконец, поменяв направление тока, увеличивайте его от нуля до +1 А. Рекомендуемый шаг изменения силы тока  $\Delta I = 0,5$  А.

2.2 Постройте график полученной зависимости.

2.3 Используя полученный график, оцените:

$B_{ост}$  - индукцию остаточного поля гвоздя при полном отключении внешнего поля;

$B_k$  - коэрцитивную силу – значение индукции внешнего поля, которое полностью размагничивает гвоздь.

## Часть 3. Магнитное поле внутри гвоздя.

Далее Вам необходимо исследовать магнитное поле, создаваемое намагниченным гвоздем. Для намагничивания поместите гвоздь симметрично внутрь соленоида. Пропустите через соленоид ток силой в 1 А в течении 5 секунд, после чего отключите ток. Повторите эту процедуру 5 раз.

Поместить датчик Холла внутрь железного гвоздя затруднительно, но с его помощью можно измерить поле вблизи поверхности соленоида.

Для повышения точности измерения датчик должен быть неподвижным. Поэтому намагниченный гвоздь с помощью кусочка пластилина закрепите на полоске миллиметровой бумаги, которую можно использовать как шкалу для измерения расстояний. Перемещайте гвоздь относительно неподвижного датчика.

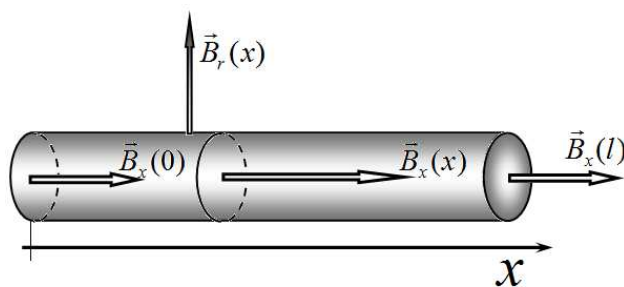
---

<sup>7</sup> Точнее, магнитного поля, создаваемого намагниченностью (или токами намагничения) материала гвоздя – но... сэкономим место!

**Вам в помощь – теоретическая подсказка!**

Совместим ось  $Ox$  с осью цилиндра (Ваш обрезок гвоздя таковым и является), начало отсчета совместим с левым торцом цилиндра.

Будем считать, что нам известны значения нормальных составляющих индукции магнитного поля у наружной поверхности цилиндра: на основаниях это  $\vec{B}_x(0)$  и  $\vec{B}_x(l)$ .



Будем считать, что эти величины постоянны на всем торце. У боковой поверхности цилиндра нормальная составляющая поля  $\vec{B}_r(x)$  является функцией координаты. Отметим, что при переходе через границу магнетиков нормальная составляющая индукции поля не изменяется.

Магнитное поле является вихревым, поэтому магнитный поток через любую замкнутую поверхность равен нулю (теорема о магнитном потоке).

3.1 Рассмотрим часть цилиндра от его левого торца до нормального к оси сечения, находящегося на расстоянии  $x$  от него.

Запишите выражение для магнитного потока через поверхность этой части цилиндра.

Запишите выражение для магнитного потока  $\Phi(x)$  через сечение цилиндра, перпендикулярное его оси и находящееся на расстоянии  $x$  от левого торца. Используя эту функцию, запишите выражение для индукции магнитного поля на оси цилиндра, в точке с координатой  $x$

3.2 Проведите измерения нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля у поверхности гвоздя. Значения  $B_r(x)$  измерьте с двух сторон гвоздя. Достаточно провести измерения с шагом 0,5 см. Измерьте также индукцию поля у торцов гвоздя.

**Не забудьте измерить и учесть фоновое напряжение  $U_\phi$  !**

Для удобства рекомендуем данные занести в следующую таблицу ( в которой клетки указывают положение датчика относительно гвоздя.

	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
$B_x(0)$												$B_x(l)$

3.3 Постройте график зависимости радиальной составляющей поля  $B_r(x)$  от координаты  $x$ . Используйте среднее значение индукции с двух сторон гвоздя.

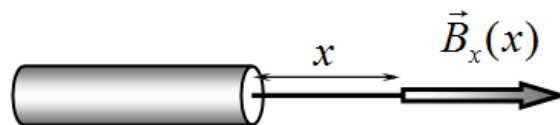
3.4 Для проверки теоремы о магнитном потоке рассчитайте магнитный поток через сечение цилиндра  $\Phi(x)$  как функцию  $x$ . Найдите магнитный поток через правый торец гвоздя. Сравните полученное значение с магнитным потоком, рассчитанным по измеренному значению  $B_x(l)$ .

3.5 Постройте график зависимости индукции магнитного поля внутри цилиндра на его оси  $B_x(x)$ . Предложите простую функцию, описывающую полученную зависимость (укажите вид этой функции, ее параметры рассчитывать не нужно).

3.6 Нарисуй схематическую картину силовых линий индукции магнитного поля вблизи поверхности цилиндра.

#### Часть 4. Магнитное поле вне гвоздя.

4.1 Измерьте зависимость индукции магнитного поля намагниченного гвоздя на его оси как функцию расстояния до его края.



4.2 Постройте график полученной зависимости.

Дайте его качественное объяснение – т.е. укажите, как эта зависимость может быть рассчитана на основании предыдущих измерений.

З

#### задача 11-2 Упругий маятник.

**Приборы и материалы:** двойной резиновый шнур, на подставке (в качестве которой используются ножки стула) линейка деревянная 40 см, линейка измерительная 40 см, секундомер.

Натяните двойной резиновый шнур между ногами перевернутого стула. Между шнурами ровно посередине поместите деревянную линейку. Если закрутить шнур, вращая линейку, то силы трения смогут удерживать линейку в подвешенном состоянии, под некоторым углом к вертикали.

Для единообразия введем следующие обозначения:

$O$  - ось вращения линейки (совпадает с местом крепления между резиновыми шнурами);

$C$  - центр масс линейки;

$\varphi$  - угол закручивания резинового шнура (угол поворота линейки, для определенности всегда будем отсчитывать от вертикали по часовой стрелке), может составлять несколько оборотов (более 10);

$n$  - число полных оборотов закручивания шнура

$\varphi_0$  - угол отклонения линейки от вертикали (меньше,

чем  $\frac{\pi}{2}$ ), отсчитывается против часовой стрелки;

очевидно, что  $\varphi = 2\pi n - \varphi_0$ ;

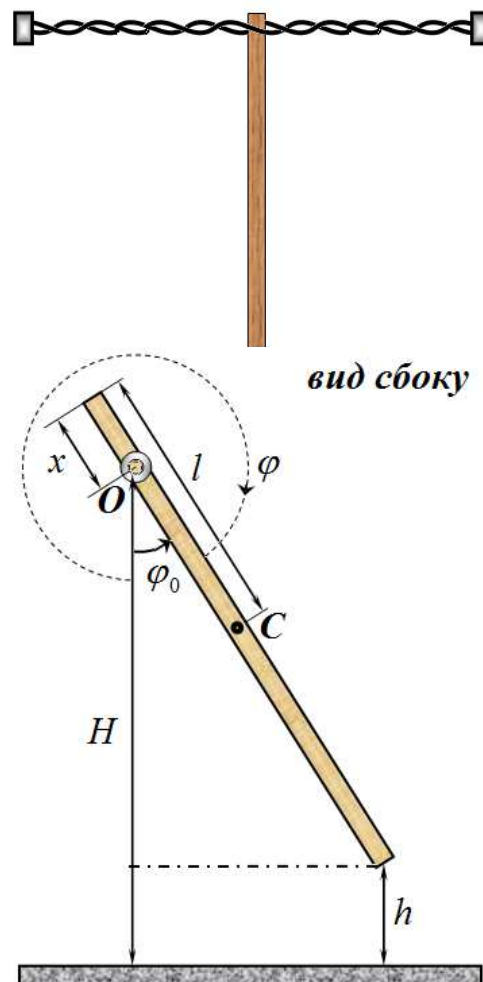
$l$  - расстояние от конца линейки до ее центра масс (следовательно, длина линейки -  $2l$ );

$x$  - расстояние от конца линейки до оси вращения;

$H$  - высота оси вращения (резинового шнура) над поверхностью стола (или любого другого нулевого уровня);

$h$  - высота нижнего конца линейки над поверхностью стола.

Условимся считать единицей измерения моментов сил величину  $M_0 = mgl$ . То есть все моменты сил (в системе СИ) следует делить на эту величину.



## Часть 1. Положения равновесия.

### 1.1 Теоретический.

Предположим, что момент сил упругости двойного резинового шнура  $M_1$  пропорционален углу закручивания (закон Гука)

$$M_1 = -k\varphi, \quad (1)$$

где  $k$  - коэффициент кручения.

*Заметим, что углы измеряются в радианах (то есть, безразмерны), если моменты сил измеряются в единицах  $M_0$ , то коэффициент  $k$  также является безразмерным.*

Запишите уравнение, позволяющее найти все возможные положения равновесия линейки (при произвольном числе оборотов закручивания  $n$ ). Дайте графическую иллюстрацию возможных решений этого уравнения. Укажите, какие из этих значений могут быть реализованы в эксперименте. Оцените максимальное число возможных положений равновесия (при известных параметрах  $l, x, k$ ).

### 1.2 Измерительный.

Измерьте все значения углов  $\bar{\varphi}_{0n}$ , при которых линейка находится в положении равновесия. Измерения проведите для  $x \approx 100$  мм.

### 1.3 Расчетный.

1.3.1 Используя полученные экспериментальные данные, постройте графики зависимости момента сил упругости двойного шнура  $M_1$  от угла закручивания  $\varphi$  для  $x \approx 100$  мм.

1.3.2 Проверьте применимость закона Гука (1) для двойного резинового шнура. При необходимости измените приведенную формулу. Определите коэффициент кручения шнура  $k$  (не забудьте о погрешностях).

***Не стремитесь точно описать полученную зависимость – выделите линейный участок и работайте с ним!***

1.3.3 Проверьте справедливость полученной вами оценки для числа возможных положений равновесия. Укажите причины возможных расхождений расчетного и измеренного числа возможных положений равновесия. Дайте улучшенную формулу этой оценки.

## Часть 2. Колебания.

Если линейку вывести из положения равновесия, то она начнет колебаться. Сейчас вам необходимо исследовать эти колебания. Все измерения проводите при  $x \approx 110$  мм и для  $n > 5$ .

***В этой части рассчитывать погрешности не требуется!***

### 2.1 Теоретический.

2.1.1 Покажите<sup>8</sup>, что периоды колебаний возле разных положений равновесия  $\bar{\varphi}_{0n}$  описываются формулой

$$T_n = \frac{T_0}{\sqrt{\cos \varphi_{0n} - \gamma}} \quad (2)$$

---

<sup>8</sup> Не тратьте много времени на вывод этой формулы, если не получается быстро, то переходите к измерениям!

2.1.2 Укажите физический смысл параметра  $T_0$  (получать явное выражение для него не нужно).

2.1.3 Получите аналитическое выражение для параметра  $\gamma$ .

## **2.2 Измерительный.**

2.2.1 Проведите измерения периодов малых колебаний  $T_n$  при различных значениях числа оборотов закручивания шнура.

2.2.2 Постройте график полученной зависимости.

## **2.3 Расчетный.**

2.3.1 Проанализируйте применимость формулы (2).

2.3.2 Определите значения параметров  $T_0$  и  $\gamma$  в формуле (2).