

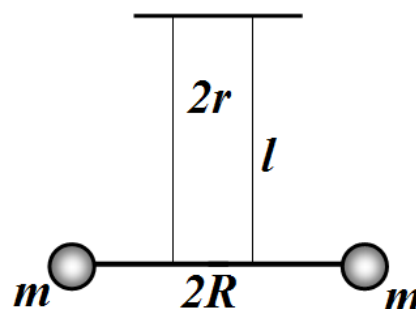
# -1. Крутильные весы Кулона. Приборы и оборудование

## Условие

### Задание 10-1. Крутильные весы Кулона.

**Приборы и оборудование:** Штатив с лапкой и кольцевой подставкой, катушка ниток, кусок пластилина, секундомер с памятью этапов, линейка, деревянная палочка с двумя алюминиевыми шариками, 2 пластиковые полоски, кусок сухой ткани, 2 деревянные палочки.

Основу установки составляют крутильные весы: длинный стержень с двумя одинаковыми шариками на концах (коромысло), симметрично подвешенный на двух параллельных длинных нитях к еще одной деревянной палочке сверху. Подобную установку использовал О. Кулон при проведении своих экспериментов, поэтому она должна быть вам знакома. На рисунке обозначено:  $l$  - длины нитей;  $2r$  - расстояние между нитями;  $2R$  - расстояние между центрами шариков.



Отметим, что закручивание нитей может проводиться как снизу (при закручивании коромысла с шариками), так и при повороте палочке сверху. Оба этих угла поворота можно измерять с помощью угломерных шкал. В качестве «источника» электростатического поля используйте пластиковую полоску, потертую о кусок ткани. Прикасаться ею к шарикам не следует.

Вам необходимо измерить (конечно, на таком примитивном приборе скорее оценить) силу взаимодействия между наэлектризованной пластиковой полоской и незаряженным металлическим шариком в зависимости от расстояния между ними.

### Часть 1. Градуировка крутильных весов

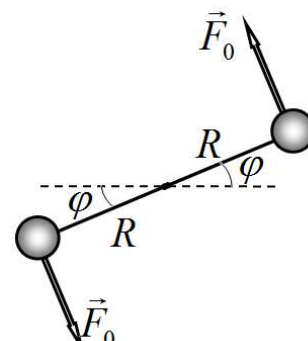
В этой части вам необходимо установить зависимость угла закручивания коромысла  $\varphi$  от момента силы, приложенной к шарикам коромысла. Обозначим массу коромысла  $m$  (она будет указана Вам в лаборатории во время выполнения задания). Обозначения геометрических параметров крутильных весов указаны на рисунке, Вы их можете измерить и при необходимости устанавливать самостоятельно.

1.1 Рассчитайте момент силы, действующий на коромысло со стороны нитей подвеса, при повороте коромысла на малый угол  $\varphi$ .

1.2 К шарикам прикладывают одинаковые по модулю и противоположно направленные силы  $F_0$ , направленные перпендикулярно коромыслу. Покажите, что угол закручивания коромысла  $\kappa$  при малых углах поворота и силы  $F_0$  пропорциональны друг другу

$$F_0 = K\varphi$$

(1)



1.3 Выразите значение коэффициента  $K$  через массу шарика, ускорение свободного падения  $g$  и геометрические параметры крутильных весов.

Прежде чем переходить к систематическим измерениям, проведите пробный качественный эксперимент. Длины нитей должны быть примерно равны 40 см, их изменять не следует.

Потерев одну из пластиковых полосок тканью (сообщив ей некоторый электрический заряд), поднесите полоску к шарiku и убедитесь, что шарик притягивается к полоске. Подберите такое расстояние между нитями  $2r$ , чтобы Ваши весы «чувствовали» притяжение полоски на расстоянии 3-4 см (от шарика до полоски).

1.4 Укажите найденное значение расстояния между нитями, обозначим соответствующий параметр  $r_0$ .

Если сила  $F_0$  хорошо описывается формулой (1), то крутильные колебания будут происходить с периодом, который определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}. \quad (2)$$

Где  $m$  - масса одного шарика.

1.5 Измерьте зависимость периода крутильных колебаний от расстояния между нитями подвеса, в диапазоне, включающем значение  $r_0$ . 1.6 Сравните вид полученной зависимости с Вашими теоретическими изысканиями.

Если формула (1) применима, то период крутильных колебаний не зависит от их амплитуды. Установите расстояние между нитями равным  $2r_0$  и больше его не изменяйте.

1.7 Измерьте зависимость периода крутильных колебаний от их амплитуды (максимального угла закручивания). Постройте график полученной зависимости. Укажите интервал углов закручивания, в котором формула (1) применима.

## Часть 2. Электростатические взаимодействия.

Предложите методику измерения силы притяжения шарика к полоске с помощью имеющегося прибора. Приведите схему установки, кратко опишите последовательность Ваших действий.

2.1 Измерьте зависимость силы притяжения (в Ньютонах) шарика к наэлектризованной полоске от расстояния между ними. Постройте график этой зависимости. 2.2 Подчиняется ли полученная вами зависимость закону Кулона? Назовите основные причины возможных отклонений от закона Кулона.

Последние советы. 1. Старайтесь каждые раз электризовать полоски одинаково. 2. Используйте «симметричную» схему: у вас два шарика, две полоски, две нити... 3. Результаты будут

более точными, если вы будете закручивать нити сверху, как это делал О. Кулон 4. Рекомендуем использовать метод отрыва ... думайте!!!

## Решение

### Задание 10-1. Крутильные весы Кулона.

#### Часть 1. Градуировка крутильных весов

**1.1** При повороте коромысла весов на малый угол  $\varphi$  нити подвеса отклоняются от вертикали на угол  $\alpha$ , который определяется геометрическим соотношением

$$l\alpha = r\varphi \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{r}{l}\varphi. \quad (1)$$

При малом угле отклонения нитей от вертикали сумма сил натяжения нити равна силе тяжести коромысла с шариками (учитывая, что косинус малого угла равен 1):

$$2N = mg \quad (2)$$

Следовательно, проекция этих сил на горизонтальную плоскость равна  $2N\alpha = mg\alpha$ . Наконец, момент этих сил равен

$$M = 2Nr\alpha = \frac{mgr}{l}\varphi. \quad (3)$$

**1.2** В состоянии равновесия момент сил притяжения уравнивается моментом сил натяжения нитей. Из формулы (3) следует, что последний пропорционален углу закручивания, поэтому и угол закручивания пропорционален действующим силам притяжения.

**1.3** Момент сил притяжения равен

$$M_1 = 2F_0R. \quad (4)$$

Приравнявая найденные моменты сил, получим

$$\frac{mgr^2}{l}\varphi = 2F_0R \quad \Rightarrow \quad F_0 = \frac{mgr^2}{2lR}\varphi. \quad (5)$$

Следовательно, коэффициент в формуле (1) условия описывается формулой

$$K = \frac{mgr^2}{2lR}. \quad (6)$$

**1.4** Пробный эксперимент показывает, что расстояние между нитями должно быть примерно равно 2 см, или

$$r \approx 1 \text{ см.} \quad (7)$$

**1.5** Измерения зависимости периода колебаний от расстояния между нитями требуют терпения и занимают достаточно много времени, так как период колебаний составляет несколько секунд (и зависит от длины нитей). Методика проведения таких экспериментов традиционная: измеряется время нескольких (не менее 5) колебаний, после чего рассчитывается период этих колебаний. Для получения зависимости  $T(r)$  необходимо провести измерения не менее, чем для 5 значений расстояния между нитями.

**1.6** Эксперимент подтверждает теоретические построения, из которых следует, что период малых колебаний обратно пропорционален расстоянию между нитями

$$T = \frac{C}{r}. \quad (8)$$

**1.7** Измерение периодов колебаний при больших углах закручивания показывают, что период этих колебаний незначительно (примерно на 10%) возрастает при возрастании угла закручивания до  $90^\circ$ .

## **Часть 2. Электростатические взаимодействия.**

**2.1** Измерения показывают, что сила притяжения при расстоянии между шариками и пластиками порядка 1 см составляет десятые доли ньютона и быстро убывает при увеличении расстояния.

**2.2** Обработка результатов измерений показывает, что закон Кулона (закон обратных квадратов) не выполняется даже приблизительно. Это связано с тем, что в данном эксперименте измеряется сила взаимодействия заряженной пластинки с незаряженным шариком, на котором пластинка индуцирует электрические заряды, поэтому сила взаимодействия убывает в степенной зависимости

$$F = \frac{C}{r^n}. \quad (9)$$

где  $n > 2$ . Сделать более точные выводы данная установка не позволяет.