

11 класс

Магнитные шарики

Погрешности в задаче оценивать не требуется!

Оборудование. Два неодимовых магнитных шара диаметром $d = 20$ мм; штатив; устройства для крепления и поворота шаров; шкала для отсчета угла поворота магнита; электронные весы; деревянная линейка; перманентный маркер; стальной шар диаметром 20 мм; струбцина; зубочистки.

Теоретическое введение.

Часть 1. Электрический диполь. Точечный диполь.

Простейший электрический диполь представляет собой систему из двух одинаковых по величине и противоположных по знаку точечных электрических зарядов, смещенных друг относительно друга на вектор $\vec{l}$, проведенный от отрицательного к положительному заряду. Электрический диполь (момент) $\vec{p}$ — это векторная величина, $\vec{p} = q\vec{l}$. Диполь называют **точечным** (или элементарным), если его размеры малы по сравнению расстоянием до диполя: $l \ll r$.

Часть 2. Диполь – дипольное взаимодействие. Взаимодействие диполя с точечным зарядом.

Сила взаимодействия точечных электрических или магнитных диполей в отличие от взаимодействия точечных масс или точечных зарядов в общем случае не подчиняется третьему закону Ньютона: направление действия этих сил может не совпадать с линией, соединяющей точечные диполи, как того требует третий закон Ньютона, хотя по величине эти силы равны между собой и направлены противоположно (это очевидное следствие из закона сохранения импульса замкнутой системы).

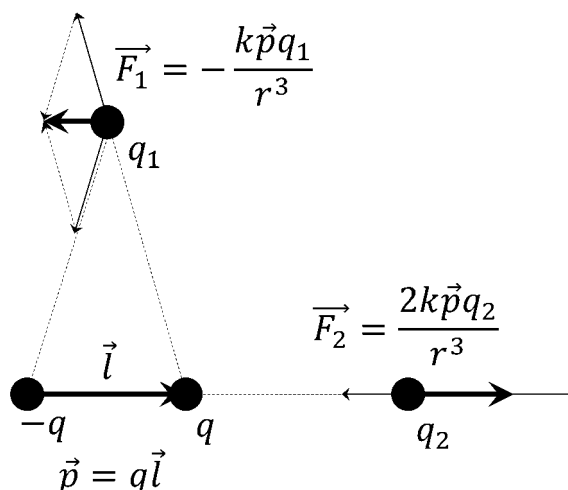


Рис. 1.

Рассмотрим, к примеру, силы взаимодействия между диполем и точечными зарядами в случае, если заряды лежат на оси диполя или в плоскости, перпендикулярной диполю (см. Рис. 1).

Несложно показать, что в приближении точечного диполя, т.е. в пределе $l \ll r$, сила, действующая на заряд q_1 :

$$\vec{F}_1 = -\frac{k\vec{p}q_1}{r^3},$$

а сила, действующая на заряд q_2 :

$$\vec{F}_2 = \frac{2k\vec{p}q_2}{r^3}.$$

Силу $\vec{F}_1$ можно найти и из следующих соображений: на диполь со стороны поля заряда действует момент сил $|\vec{M}_q| = pE_q = \frac{kpq}{r^2}$. Поскольку полный момент внутренних сил, как следует из закона сохранения момента импульса, равняется нулю, то $\vec{M}_q$ должен компенсироваться моментом силы взаимодействия заряда с диполем: $|\vec{M}_1| = F_1 r$. В итоге приходим к тому же результату:

$$\vec{F}_1 = -\frac{k\vec{p}q_1}{r^3}$$

Часть 3. Электрические и магнитные диполи.

В силу отсутствия в природе магнитных зарядов (монополей), магнитный диполь нельзя определить аналогично электрическому. Но эксперимент и теория показывают, что картина силовых линий напряженности $\vec{E}$ поля электрического точечного диполя $\vec{p}$ не отличается от картины силовых линий магнитной индукции $\vec{B}$ магнитного точечного диполя $\vec{p}_m$ (маленького постоянного магнетика или виточка с током). Соответственно, с точностью до обозначений и констант, не отличаются и законы взаимодействия магнитных и электрических диполей. Это означает, что, получив законы взаимодействия электрических точечных диполей и заменив в формулах $\vec{p}$ на $\vec{p}_m$, а константу электрического взаимодействия $k_\epsilon = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{М}}{\text{Ф}}$ на константу магнитного взаимодействия $k_\mu = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$, мы сможем рассчитать поля и законы взаимодействия магнитных диполей. При этом необходимо иметь ввиду, что вектор магнитного момента $\vec{p}_m$ постоянного магнита направлен от южного к северному полюсу (для витка с током это направление соответствует правилу буравчика).

Часть 4. Магнитный шар.

Шарообразные магниты в нашей работе изготовлены из магнито жесткого материала (неодима). Это означает, что под действием внешних магнитных полей намагниченность шара не изменяется, и он ведет себя как жесткий диполь.

Поле однородно намагниченного шара радиусом R на расстояниях $r \geq R$ совпадает с полем точечного магнитного диполя $\vec{p}_m$, равного полному магнитному моменту шара и

расположенного в его центре. Взаимодействуют магнитные шары, как жесткие точечные диполи, расположенные в центрах шаров.

Часть 5. Стальной шар в магнитном поле.

Стальной шар изготовлен из магнитомягкого материала с очень узкой петлей гистерезиса. Это означает, что, в отсутствие магнитных полей, шар практически не намагничен и, соответственно, не несет никакого магнитного момента. В магнитном поле он намагничивается, приобретая магнитный момент пропорциональный индукции магнитного поля $\vec{B}$:

$$\vec{p}_m = \alpha \vec{B}.$$

В результате возникает взаимодействие между наведенным магнитным моментом шара $\vec{p}_m$ и магнитным моментом $\vec{p}_m$ постоянного магнита.

Часть 6. Формулы, которые могут потребоваться в предлагаемой работе.

Индукция магнитного поля точечного магнитного диполя на расстоянии:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{p}_m, \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3} \right)$$

На магнитный диполь $\vec{p}_m$ в поле $\vec{B}$ действует механический момент сил:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

Энергия диполя $\vec{p}_m$ в поле $\vec{B}$:

$$W = -(\vec{p}_m, \vec{B})$$

Полезно также иметь ввиду, что при вычислении полей, а также сил, действующих на диполь $\vec{p}_m$, его всегда можно представить в виде двух (или нескольких) диполей, векторная сумма которых равна моменту рассматриваемого диполя $\vec{p}_m$ — это следует из свойства аддитивности магнитного момента и принципа суперпозиции магнитных полей (см. Рис.2).

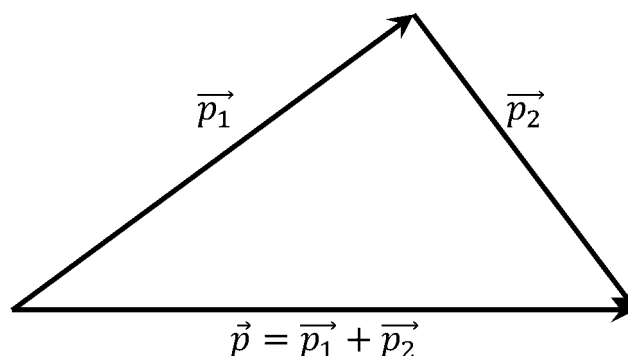


Рис. 2.

Часть 7. Основная задача нашего эксперимента.

Сила взаимодействия двух шарообразных магнитов изменяется при повороте одного шара относительно другого. В этом не сложно убедиться экспериментально: не изменяя расстояние между двумя притягивающимися магнитами, поверните один из шаров на 180° , и Вы обнаружите, что притяжение сменится отталкиванием. Если же один из шаров повернуть на 90° , то Вы явно почувствуете силу, направленную перпендикулярно к линии, соединяющей центры шаров.

В данной работе предлагается исследовать зависимость **полной** силы взаимодействия двух постоянных шарообразных магнитов от взаимной ориентации их магнитных моментов, а также исследовать силу притяжения (отталкивания) магнитного и стального шаров.

Задание.**Часть 8. Экспериментальная.**

Снимите зависимости продольной (притяжение или отталкивание) $F_r(\theta)$ и поперечной $F_\tau(\theta)$ (перпендикулярной к $\vec{r}$) составляющих силы взаимодействия двух магнитных шаров от угла θ между их магнитными моментами (см. Рис.3). Расстояние между центрами шаров возьмите равным $r = 10$ см; магнитный момент $\vec{p}_m$ одного из шаров (неподвижного) направлен вдоль прямой, соединяющей центры шаров.

Опишите и зарисуйте схему установки и методику измерений $F_r(\theta)$ и $F_\tau(\theta)$, а также Ваш метод юстировки (настройки) установки.

Постройте графики вышеуказанных зависимостей на одной координатной плоскости.

Примечание. Будьте внимательны, если показания весов не меняются в течении минуты, весы отключаются, поэтому проводите измерения без особых задержек!

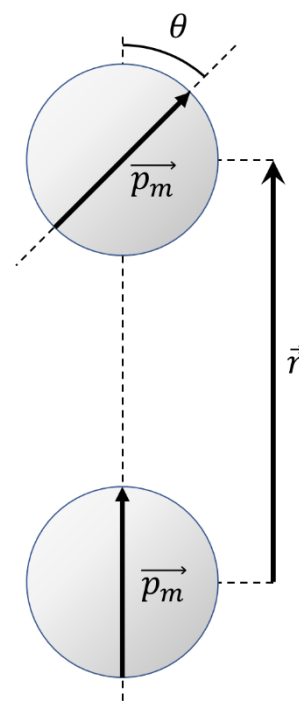


Рис. 3.

Рекомендация по использованию зубочистки. Для надежного закрепления шара и в качестве стрелки-указателя угла поворота удобно использовать зубочистку. Для этого вставьте ее между шаром и креплением.

Часть 9. Теоретическая.

Получите теоретические зависимости $F_r(\theta)$, $F_\tau(\theta)$ и $F(\theta)$ — **полной** силы взаимодействия магнитных шаров. Постройте график зависимости $F(\theta)$ на той же координатой плоскости, что и в Части 1.

Определите теоретическое значение отношения $\frac{F_{max}}{F_{min}}$ (во сколько раз максимальное значение полной силы больше, чем минимальное).

Сравните полученное значение с экспериментальными данными.

Часть 10. Оценочная.

Исследуйте зависимость продольной составляющей силы $F_r(\theta)$ (притяжение или отталкивание) взаимодействия постоянного шарообразного магнита со стальным шаром от угла θ между магнитным моментом $\vec{p}_m$ постоянного магнита и линией, соединяющей центры шаров при расстоянии между центрами шаров $r = 4$ см. Экспериментально определите $\frac{F_{rmax}}{F_{rmin}}$.

Рассчитайте $\frac{F_{rmax}}{F_{rmin}}$ теоретически и сравните полученное значение с экспериментальным.

Из теории известно, что $F_r(\theta)$ имеет вид $F_r(\theta) = A(1 + \beta \cos n\theta)$. Определите экспериментально значения β и n .