

11 класс

Задача 1. Магнитные шары

Поле однородно намагниченного шара радиусом R на расстояниях $r \geq R$ от центра шара совпадает с полем точечного диполя \vec{P}_m , равного полному магнитному моменту шара, расположенного в его центре и направленного от южного (S) к северному (N) магнитному полюсу. Например, магнитное поле Земли хорошо описывается полем точечного магнитного диполя, расположенного в ее центре.

Полный магнитный момент определяется намагниченностью \vec{p} вещества, из которого изготовлен шар. По определению, намагниченность — это магнитный момент единицы объёма. Для однородно намагниченного шара намагниченность равна: $\vec{p} = \vec{P}_m/V$, где V — объём шара.

Если шар изготовлен из магнитожёсткого материала, то можно считать, что под действием внешних магнитных полей его намагниченность не изменяется и шар ведёт себя как жёсткий диполь.

Электрическим аналогом магнитного шара из магнитожёсткого материала является диэлектрический шар, изготовленный из электрета — материала с «замороженной» поляризацией. Шар, изготовленный из электрета, ведёт себя в электрическом поле точно так же, как и шар с постоянной намагниченностью в магнитном поле. Это означает, что формулы, описывающие взаимодействие постоянных шарообразных магнитов между собой и с магнитным полем, полностью — с точностью до обозначений — идентичны формулам, описывающим поведение электрических диполей в электрическом поле.

Напомним основные формулы, которые могут вам потребоваться в предлагаемой работе:

1. Индукция поля \vec{B} точечного магнитного диполя \vec{P}_m в точке с радиус-вектором \vec{r} относительно диполя (система СИ):¹

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

где μ_0 — магнитная константа.

2. На магнитный диполь \vec{P}_m в поле \vec{B} действует момент сил:²

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

3. Энергия диполя \vec{P}_m в поле \vec{B} :

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

¹Здесь за (\vec{a}, \vec{b}) обозначено скалярное произведение векторов \vec{a} и \vec{b} .

²Здесь за $[\vec{a}, \vec{b}]$ обозначено векторное произведение векторов \vec{a} и \vec{b} .

Задание:

1. Для магнита с диаметром $d_5 = 15$ мм определите расположение его северного (N) и южного (S) полюсов и подробно опишите способ определения полюсов. Отметьте синим фломастером северный полюс магнита, а красным — южный.

2. Снимите зависимость максимальной силы притяжения $F(r)$ от расстояния r между центрами шаров диаметром $d = 15$ мм. Опишите метод измерений, результаты измерений занесите в таблицу 1. Считая $F \sim r^n$, определите n . Сравните результат с теорией. При расчетах считайте, что взаимодействие двух однородно намагниченных шаров можно рассматривать как взаимодействие точечных диполей, расположенных в центрах шаров.

3. Измерьте максимальную силу сцепления F_{ii} двух одинаковых шаров с диаметрами $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$, результаты занесите в таблицу 2. Проанализируйте полученные результаты и сравните намагниченности шаров.

4. Найдите отношение p_{20}/p_{10} намагниченности p_{20} шара диаметром $d_6 = 20$ мм к намагниченности p_{10} шара диаметром $d_4 = 10$ мм, внесите результат в таблицу 3.

5. Найдите отношение B_{20}/B_{10} величины индукции магнитного поля B_{20} на полюсе магнита диаметром $d_6 = 20$ мм к величине индукции магнитного поля B_{10} на полюсе магнита диаметром $d_4 = 10$ мм, внесите результат в таблицу 3.

6. Измерьте максимальные силы сцепления шаров F_{ij} различных диаметров для всевозможных пар, занесите результаты в таблицу 4.

7. Выразите максимальную силу сцепления F_{ij}^t шаров разных диаметров d_i и d_j , используя значения сил сцепления шаров с одинаковыми диаметрами F_{ii} и F_{jj} .

8. Рассчитайте значения F_{ij}^t , результаты занесите в таблицу 5. Сравните полученные расчетные значения силы с экспериментальными, измеренными в пункте 6.

Оборудование.

Шарообразные магниты различных диаметров из магнитожёсткого материала (по паре каждого диаметра): $d_1 = 3$ мм, $d_2 = 5$ мм, $d_3 = 7$ мм, $d_4 = 10$ мм, $d_5 = 15$ мм и $d_6 = 20$ мм, точность измерения диаметров $d - 0,1$ мм; электронные весы (безмен); штатив с закреплёнными уголками с отверстиями; четыре немагнитные чашечки на коромыслах; 8 пластинок толщиной $h = 1,2 \pm 0,05$ мм каждая.

ВНИМАНИЕ. Уважаемые участники олимпиады! Рекомендуем вам не располагать механические часы вблизи магнитных шариков. Обращаем также ваше внимание на то, что магнитные шарики могут нанести вред в случае заземления участка кожи между двумя шариками.