

Лабораторная работа. Магнитный шар. Алексей Гуденко

Определение характеристик шарообразных магнитов: магнитных моментов, намагниченности и остаточной магнитной индукции. Магнитное поле Земли.

Цель работы.

Знакомство с магнитными явлениями, законами взаимодействия магнитов, экспериментальное определение характеристик неодимовых магнитов. Особенности магнитного поля Земли.

Оборудование.

Неодимовые магнитные шары разных диаметров, весы, штангенциркуль, набор бумаги для заметок (толщина стопки ~ 30 мм), измеритель магнитной индукции АТЕ-8702.

Необходимые сведения.

1. Точечный магнитный диполь.

Диполь (магнитный, электрический) называют точечным (или элементарным), если его размеры ℓ малы по сравнению с расстояниями до диполя r .

Магнитное поле точечного диполя с магнитным моментом \mathbf{P}_m определяется по формуле, аналогичной формуле поля для точечного электрического диполя:

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

Вектор магнитного момента \mathbf{P}_m направлен от южного (S) к северному (N) полюсу.

2. Сила взаимодействия магнитных шаров.

Магнитное поле однородно намагниченного шара совпадает с полем точечного диполя, расположенного в центре шара. Два однородно намагниченных шара с магнитными моментами \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 направленными вдоль соединяющей их прямой взаимодействуют как точечные диполи с силой:

$F = P_m \partial B / \partial r = P_m \partial (2P_m/r^3) / \partial r = -(\mu_0/4\pi) 6P_m^2/r^4$, где r – расстояние между центрами шаров.

(Эта формула аналогична формуле для силы взаимодействия электрических диполей $F = P \partial E / \partial r = P \partial (2P/r^3) / \partial r = -(1/4\pi\epsilon_0) 6P^2/r^4$).

Магниты притягиваются, если их магнитные моменты сонаправлены $\mathbf{P}_1 \uparrow \uparrow \mathbf{P}_2$ (а именно так выстраиваются магнитные моменты магнитов, когда их подносят друг к другу), и отталкиваются, если моменты направлены противоположно друг другу $\mathbf{P}_1 \uparrow \downarrow \mathbf{P}_2$.

Одинаковые шары с магнитными моментами $P_1 = P_2 = P_m$ притягиваются с силой:

$F = P_m \partial E / \partial r = P_m \partial (2P_m/r^3) / \partial r = -(\mu_0/4\pi) 6P_m^2/r^4$.

(Если магнитные моменты расположены перпендикулярно соединяющей их прямой, то сила их взаимодействия окажется в два раза меньше:

$F = (\mu_0/4\pi) 3P_m^2/r^4$).

Зная массу магнитных шариков m и определив максимальное расстояние, на котором шары ещё удерживают друг друга, можно рассчитать величину магнитного момента P_m каждого шарика (см рис.):

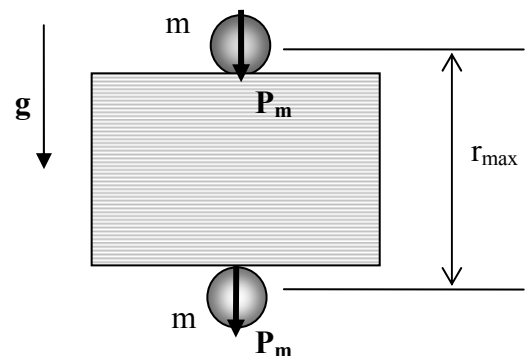
$(\mu_0/4\pi) 6P_m^2/r_{\max}^4 = mg \rightarrow$

$P_m = (mgr_{\max}^4/6(\mu_0/4\pi))^{1/2}$.

По величине магнитного момента P_m можно рассчитать величину индукции магнитного поля вблизи поверхности шара радиуса R . Максимальные величины индукции наблюдаются на полюсах:

$\mathbf{B}_p = (\mu_0/4\pi) 2P_m/R^3$

(на экваторе поле в два раза меньше).



Силовые линии «выходят» из северного и «входят» в южный полюс магнита.

3. Намагниченность. Остаточная магнитная индукция.

По величине магнитного момента P_m можно рассчитать **намагниченность** вещества магнита, которая определяется как магнитный момент единицы объёма:

$$p_m = P_m/V.$$

Эта важная характеристика магнитных материалов, определяющая, в частности, величину **остаточной магнитной индукции** $B_r = \mu_0 p_m$ (эта одна из величин, которая, как правило, указывается в справочниках по магнитным материалам).

Магнитное поле на полюсе шара связано с величиной намагниченности и остаточной магнитной индукцией формулой:

$$B_p = 2/3 \mu_0 p_m = 2/3 B_r.$$

4. Ориентирующее воздействие магнитного поля на магнитный момент (диполь).

В магнитном поле на точечный магнитный диполь действует механический момент сил:

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

Под действием вращающего момента \mathbf{M} свободный постоянный магнит (или виток с током) поворачивается так, чтобы его магнитный момент выстроился вдоль вектора индукции магнитного поля $\mathbf{P}_m \uparrow \uparrow \mathbf{B}$. Это – положение устойчивого равновесия: при отклонении от этого положения возникает момент внешних сил, возвращающий диполь к положению равновесия.

5. Энергия диполя в поле.

В магнитном поле магнитный диполь обладает энергией:

$$W = -(\mathbf{P}_m \mathbf{B})$$

Из этой формулы, в частности, следует, что минимальной энергией $W = -P_m B$, как и следовало ожидать, магнитный диполь обладает в положении устойчивого положения $\mathbf{P}_m \uparrow \uparrow \mathbf{B}$. (Обратим внимание на то, что формула для энергии диполя в магнитном поле очень удобна для выяснения единиц измерения магнитного диполя: $[P_m] = [W]/[B] = \text{Дж/Тл}$).

6. Магнитное поле Земли.

Магнитное поле Земли соответствует полю однородно намагниченной сферы с координатами полюсов: Северного (в Южном полушарии) $\varphi = 71,2^\circ$, $\lambda = 150,8^\circ$ и Южного (в Северном полушарии) $\varphi = 70,5^\circ$, $\lambda = 264^\circ$. Магнитным наклоением называется угол β , который образует вектор индукции магнитного поля Земли с горизонтальной плоскостью.

Задание

1. Проложите между двумя маленькими магнетиками брусок из немагнитного материала. Подкладывая между бруском и верхним магнетиком листы бумаги, выясните на каком максимальном расстоянии r_{\max} магнетики удерживают друг друга в поле тяжести земли.
2. Взвесьте магнетики на весах.
3. Рассчитайте величину магнитного момента магнетика P_m , приравняв силу притяжения двух магнитных диполей $F = (\mu_0/4\pi) 6P_m^2/r_{\max}^4$ силе тяжести $F_T = mg$. Результаты занесите в таблицу.
4. Рассчитайте намагниченность $p_m = P_m/V$ и величину остаточной магнитной индукции $B_r = \mu_0 p_m$ материала ваших магнетиков. Найдите табличные значения остаточной магнитной индукции для магнитожёстких материалов и сравните эти значения со своими.
5. Рассчитайте величину индукции магнитного поля на полюсах ваших магнитов. С помощью магнетометра измерьте величину магнитного поля вблизи полюсов магнитов и сравните полученные значения с расчётными.

6. Пометьте на больших шарах положения полюсов S и N. Положите шары на ровную поверхность. Оцените угол β , который образует линия S→N с горизонтом.
7. Рассчитайте величину β_T магнитного наклона на нашей широте ($\varphi \approx 60^\circ$) магнитного поля Земли, считая её однородно намагниченным шаром. Сравните полученное значение с углом β , полученным в п.6.