

УДК 537.63
PACS 41.20.GZ

Экспериментальное исследование движения магнитного диполя по проводящей поверхности

В.А. Саранин

Глазовский государственный педагогический институт им. В.Г. Короленко
427621, Глазов, ул. Первомайская, 25
Email: val-sar@yandex.ru

Экспериментально исследованы движения небольших цилиндрических (диаметром порядка 1 см) неодимовых магнитов по наклонной проводящей неферромагнитной (дюралюминиевой) поверхности. Измерялось время соскальзывания магнита по наклонному желобу при трех его разных наклонах. Установлено, что в случае, когда вектор магнитного момента магнита параллелен поверхности, его скорость при скольжении по поверхности в перпендикулярном вектору магнитного момента направлении в 2 – 3 раза (в зависимости от параметров магнита) больше скорости движения в случае, когда векторы скорости и магнитного момента параллельны (антипараллельны). Эти движения удавалось пронаблюдать с помощью направляющей пластинки, установленной на магнитах. Если направляющую пластинку убрать, то движение магнита по плоской поверхности в случае параллельных векторов скорости и магнитного момента неустойчиво – магнит достаточно быстро (на пути в один, два его характерных размеров) самопроизвольно разворачивается так, чтобы эти векторы были взаимно перпендикулярны. При скатывании таблеткообразного цилиндрического магнита, намагниченного вдоль диаметра, когда основание цилиндра скользит по проводящей поверхности, его вращение неравномерно. Относительно быстрое вращение периодически сменяется медленным. При свободном падении в поле тяжести (например, в неферромагнитной проводящей трубке) магниты ориентируются магнитным полем Земли так, что всегда падают своим северным полюсом вниз. Объяснение явления неустойчивого движения связано с движением проводника в неоднородном поле. Оценка времени разворота магнита за счет действия механического момента со стороны магнитного поля Земли дает примерно 3 с, что вполне достаточно для совершения разворота.

Ключевые слова: движение магнита по проводящей поверхности; скорость скольжения магнита по проводящей поверхности; падение магнита в проводящей трубке

Поступила в редакцию 18.10.2017; принята к опубликованию 01.11.2017

Experimental research of movement of a magnetic dipole on a conducting surface

V. A. Saranin

Glazov State Pedagogical Institute named after V. G. Korolenko
25 Pervomaiskaya str., Glazov, 427621
Email: val-sar@yandex.ru

Experimentally investigated the motion of small neodymium magnets (diameter about 1 sm) on an inclined conducting non-ferromagnetic (dural) surface. Time was measured the sliding magnet on an

inclined chute with three different slopes. It is established that in the case when the vector of the magnetic moment of the magnet is parallel to the surface, its speed when sliding on a surface perpendicular to the vector of the magnetic moment direction in 2 – 3 times (depending on parameters of the magnet) more speed in the case where the velocity vectors and the magnetic moment are parallel. These movements were able to observe using the guide plate installed on the magnets. If the guide plate is removed, the movement of a magnet over a flat surface in the case of parallel velocity vectors and the magnetic moment is unstable – magnet fast enough (on the way to one, two its characteristic dimensions) spontaneously takes place so that these vectors are perpendicular. When rolling tabletcelebrex a cylindrical magnet, magnetized along the diameter when the base of the cylinder slides over a conductive surface, its rotation is uneven. Relatively rapid rotation is periodically replaced by slow. The free fall in the gravity field (e.g., non-ferromagnetic conducting pipe) magnets are oriented by the magnetic field of the Earth so that it is always fall to its North pole down. The explanation of the phenomenon of intermittent motion associated with the motion of the conductor in an inhomogeneous field. Evaluation of the time reversal of the magnet due to the action of the mechanical moment exerted by the magnetic field of the Earth provides approximately 3 s, which is sufficient to make a reversal.

Keywords: the movement of the magnet over a conducting surface; the sliding speed of the magnet over the conducting surface; the falling magnet in a conducting tube

Received 18.10.2017; accepted 01.11.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53

1. Введение

Хорошо известно, что близкое относительное движение магнита и проводящей неферромагнитной (пара - или диамагнитной) пластины (трубки) возбуждает в ней токи Фуко и препятствует движению в соответствии с правилом Ленца. В этой ситуации магнит даже в поле тяжести начинает двигаться с постоянной скоростью [1]. Многочисленные иллюстрации этого явления можно найти в Интернете. Некоторые результаты исследования тормозящей силы, возникающей при движении магнита, приведены в работах [2, 3]. С научно-методической точки зрения представляло интерес провести экспериментальное исследование движения магнита вдоль проводящей неферромагнитной поверхности, например, при различной взаимной ориентации векторов магнитного момента и скорости, которое ранее не проводилось. Изложению результатов этого исследования и посвящена настоящая статья.

2. Эксперименты

В основных экспериментах использовался неодимовый магнит в виде цилиндрической таблетки диаметром 12 мм и толщиной 6 мм, намагниченный вдоль диаметра. Для того чтобы задать ему постоянное нужное направление движения, к нему кусочком пластилина прилеплялась направляющая пластинка из пластика (рис. 1). Эта конструкция скользила по гладкой наклонной дюралюминиевой поверхности в виде желоба (диаметр закругления желоба 35 мм) длиной 1600 мм с постоянной скоростью. Постоянство скорости скольжения магни-

та подтверждают высокоточные эксперименты с применением робототехнических датчиков [1]. Сначала скольжение происходило в положении *a*, (рис. 1), при этом направление движения (вектор скорости показан вверху) было параллельно магнитному моменту магнита, затем в положении *b*, (рис. 1), движение осуществлялось перпендикулярно магнитному моменту.

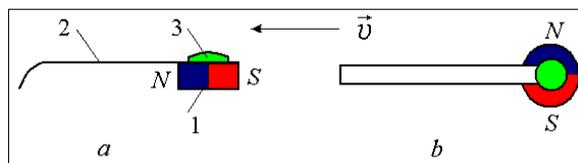


Рис. 1. Магнит, намагниченный вдоль диаметра (1), с направляющей пластинкой (2), прикрепленной к магниту кусочком пластилина (3): *a* – вид сбоку, скорость движения магнита параллельна магнитному моменту, *b* – вид сверху, скорость движения перпендикулярна магнитному моменту.

С помощью секундомера с ценой деления 0,1 с измерялось время скольжения магнита в каждом положении. Измерения проводились для трех разных наклонов желоба: 30°, 38°, 42°, по 10 измерений в каждом положении. Результаты измерений представлены на рис. 2. По вертикали отложено время скольжения в секундах, по горизонтали – номер опыта. Точки и прямые средних значений времени 1, 2, 3 соответствуют скольжению магнита в положении, когда магнитный момент перпендикулярен вектору скорости (положение *b*, рис.1) и

углам 42° , 38° , 30° . Точки и прямые средних значений времени 4, 5, 6 соответствуют тем же углам, но вектор скорости и магнитный момент параллельны (антипараллельны) (см. рис. 1, положение *a*). Отношения средних времен, а, следовательно, и обратных значений скоростей скольжения равны

$$\frac{\bar{t}_4}{\bar{t}_1} = \frac{\bar{v}_\perp}{\bar{v}_\parallel} = 1.92, \quad \frac{\bar{t}_5}{\bar{t}_2} = 1.91, \quad \frac{\bar{t}_6}{\bar{t}_3} = 1.82. \quad (1)$$

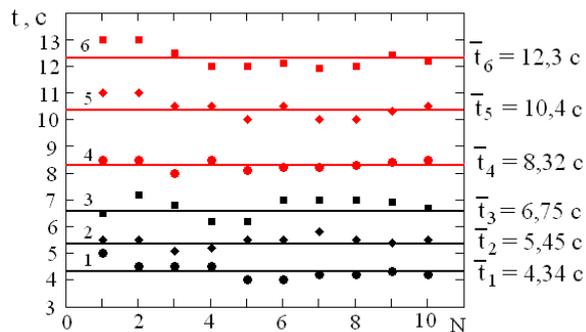


Рис. 2. Зависимость времени соскальзывания магнита от номера опыта. Три нижние серии точек соответствуют движению магнита, когда его магнитный момент перпендикулярен вектору скорости, три верхние серии точек соответствуют движению магнита, когда его магнитный момент параллелен (антипараллелен) вектору скорости: 1, 4 – угол наклона поверхности скольжения 42° , 2, 5 – угол наклона 38° , 3, 6 – угол наклона 30°

Аналогичные эксперименты, проведенные на плоской дюралюминиевой поверхности, дали примерно такие же результаты, но из-за небольших случайных отклонений от прямолинейного движения магнита разброс значений времени был больше. Тем самым можно заключить, что кривизна желоба не оказывала существенного влияния на величину скорости.

Кроме основного магнита в опытах использовались: неодимовый магнит, намагниченный вдоль диаметра в виде цилиндрической таблетки диаметром 12 мм и толщиной 1.5 мм, неодимовый магнит в виде таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1.8 мм, намагниченный в направлении оси цилиндра, и неодимовый магнит в виде квадратной пластинки со стороной 20 мм и толщиной 2.0 мм, сложенный из двух одинаковых пластинок размерами 10×20 мм, намагниченных вдоль меньшей стороны (он скользил по плоской дюралюминиевой пластине с бортиком). Время соскальзывания магнита, намагниченного с торцов, как и следовало ожидать, не зависело от его ориентации, так как его магнитный момент был перпендикулярен пла-

стине, и в пределах погрешности совпадало с временем соскальзывания магнита, намагниченного по диаметру, в случае, когда его магнитный момент был перпендикулярен вектору скорости. Для магнита, намагниченного по диаметру, отношение времен соскальзывания (т.е. и скоростей) оказалось равным

$$\left(\frac{\bar{v}_\perp}{\bar{v}_\parallel} \right)_2 = 3.2 \pm 0.1. \quad (2)$$

Для магнита в виде квадратной пластинки получим следующее отношение скоростей:

$$\left(\frac{\bar{v}_\perp}{\bar{v}_\parallel} \right)_3 = 3.0 \pm 0.1. \quad (3)$$

Тот факт, что отношение скоростей у основного магнита меньше, вероятно, связано с его большей толщиной – часть силовых линий оставалась в толще магнита и не пересекала пластину.

Был также проведен следующий опыт. Спрямоугольная пластиковая пластинка прикреплалась сверху к магниту точно посередине (рис. 3), и магнит скользил по плоской дюралюминиевой пластине сначала так, что магнитный момент был перпендикулярен направлению движения, в этом случае движение было устойчивым. Если же движение магнита начиналось в положении, когда магнитный момент параллелен (антипараллелен) скорости, то движение было неустойчивым: он достаточно быстро (на протяжении 1–2 его диаметров) разворачивался в положение устойчивого движения.

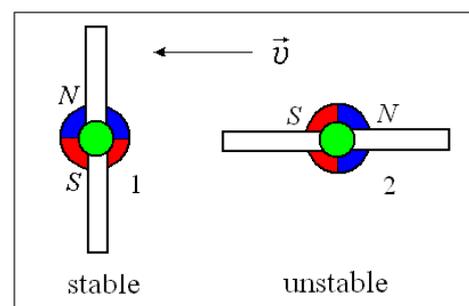


Рис. 3. Движение магнита без влияния направляющей пластинки. Движение в положении 1 устойчиво, в положении 2 – неустойчиво

Кроме поступательного движения магнита было исследовано его качение по проводнику. Для этого дюралюминиевый уголок (цифра 2 на рис. 4 *a*) наклонялся к горизонтали и слегка к вертикали так, чтобы по нему мог скатываться магнит (цифра 1, рис. 4 *a*). Снизу на уголок помещалась непроводящая пластинка (цифра 3, рис. 4 *a*). Скатывание снималось на видео с частотой 40 кадров

в секунду. Магнит, намагниченный с торцов, скатывался равномерно. Магнит, намагниченный по диаметру, скатывался неравномерно: быстрое вращение чередовалось с медленным. На рис. 4 *b* показаны последовательные положения такого магнита в моменты времени t_1, t_2, t_3 . При этом при компьютерной обработке видеофрагментов оказалось $(t_2 - t_1) \approx 1.35$ с, $(t_3 - t_2) \approx 0.70$ с.

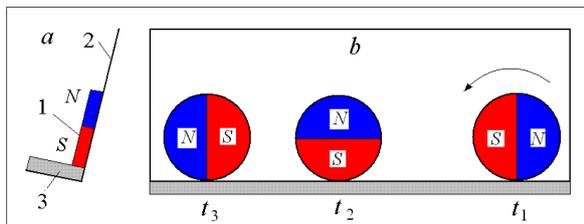


Рис. 4. Неравномерное вращение скатывающегося магнита, намагниченного по диаметру: 1 – магнит, 2 – дюралюминиевый уголок, 3 – непроводящая пластинка

При исследовании явления свободного падения магнита в вертикальной проводящей неферромагнитной трубке внутренним диаметром 14 мм и толщиной стенки 1.3 мм было установлено, что ориентация магнитного момента относительно оси трубки не оказывает существенного влияния на скорость его падения. Однако за время падения в трубке длиной 470 мм, составлявшем примерно секунду, таблеткообразные магниты, параметры которых были указаны выше, успевали развернуться в магнитном поле Земли и всегда падали своим северным полюсом вниз.

3. Теоретические оценки

Сначала рассмотрим следующую модельную задачу. По двум проводам, замкнутым на сопротивление R , расстояние между которыми l , в перпендикулярном к ним магнитном поле индукцией B под действием внешней силы F скользит проводящая перемычка (рис. 5). Требуется найти скорость этой перемычки. Сопротивлением проводов и перемычки пренебрегаем.

При движении перемычки в ней возникает ток, в результате на нее начинает действовать сила Ампера, уравновешивающая внешнюю силу, и перемычка движется с постоянной скоростью. Эта задача в разных вариантах встречается во многих задачниках, поэтому приведем лишь ответ:

$$v = \frac{FR}{B^2 l^2}. \quad (4)$$

Скорость оказывается обратно пропорциональной произведению $B^2 l^2$, которое можно назвать квадратом линейного магнитного потока. Обратим

внимание на то, что здесь важно относительное движение проводника и магнитного поля.

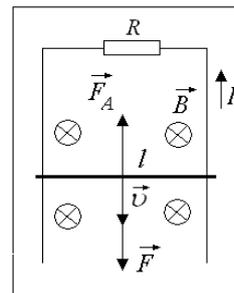


Рис. 5. Модельная задача о скольжении проводника в магнитном поле

Перейдем к рассмотрению движения магнита относительно проводника. Будем считать магнит точечным диполем. Тогда магнитная индукция, создаваемая им, равна

$$\vec{B} = k \left(\frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r})\vec{r} - \vec{p}_m r^2}{r^5} \right), \quad k = \frac{\mu_0}{4\pi}. \quad (5)$$

где p_m - магнитный момент диполя. В проекциях на оси x, z (плоскость x, z содержит в себе диполь, вектор которого направлен по оси z) в сферических координатах это дает [4]:

$$B_x = kp_m \frac{3 \sin \theta \cos \theta}{r^3}, \quad B_z = kp_m \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{r^3}. \quad (6)$$

Если считать плоскость (x, z) совпадающей с проводящей поверхностью, то, как при движении вдоль оси z , так и при движении вдоль оси x , линейный поток создается только компонентой B_y , которая, в силу аксиальной симметрии магнитного поля диполя, удовлетворяет равенству $B_y = B_x$. Тогда линейный магнитный поток в обоих случаях движения одинаков и по величине равен

$$4 \int_0^{\pi/2} B_y (r = R_0 / \cos \theta) dl_{\perp}, \quad dl_{\perp} = \frac{R_0 d\theta}{\cos^2 \theta}, \quad (7)$$

где R_0 - радиус магнита, dl_{\perp} - отрезок прямой, перпендикулярной направлению движения магнита и проходящей через его полюс. Тем самым в соответствии с формулой (4) на величину скорости влияет только сопротивление R , т.е. в реальной ситуации в основном распределение и величина токов Фуко.

Для оценки возможности разворота магнита при падении в трубке рассмотрим падение ниодимового магнита в виде цилиндрика (таблетки) радиусом $R_0 = 5$ мм и толщиной $h = 1.8$ мм, намагниченного вдоль оси цилиндрика. Чтобы найти его

магнитный момент, поступим следующим образом.

Известно, что сила притяжения магнита с площадью основания S равна [5]

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}. \quad (8)$$

Эту силу можно найти экспериментально с помощью динамометра, отрывая магнит от ферромагнитной пластинки. Она оказалась равной $F \approx 2.94$ Н. Тогда магнитная индукция на оси этого магнитного диполя равна

$$B_{zm} = \sqrt{\frac{2\mu_0 F}{\pi R_0^2}} \approx 0.30 \text{ Тл}. \quad (9)$$

С другой стороны, согласно (7) имеем

$$B_{zm} = \frac{2k p_m}{r^3}. \quad (10)$$

Отсюда магнитный момент магнита

$$p_m = \frac{B_{zm} (h/2)^3}{2k} \approx 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ А}\cdot\text{м}^2. \quad (11)$$

Величина механического момента, разворачивающего магнит в магнитном поле Земли, равна

$$M = p_m B_E. \quad (12)$$

Он создает угловое ускорение:

$$\varepsilon = \frac{M}{I}, \quad I = 0.5 m a^2. \quad (13)$$

Масса магнита оказалась равной $m = 7.7$ г. Индукцию магнитного поля Земли на нашей широте примем равной $B_E = 52$ мкТл [6], а угол поворота π . Тогда время поворота

$$t = \sqrt{\frac{2\phi}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2\pi}{\varepsilon}} \approx 2.9 \text{ с}. \quad (14)$$

По порядку величины это соответствует опытным данным.

Дадим теперь качественное объяснение явлению устойчивого и неустойчивого движения магнита. На рис. 6 показана зависимость компоненты $B_y = B_x$ в единицах kp_m/r^3 , создающей линейный поток, от полярного угла в радианах (6). Видно, что вблизи полюсов – максимумы индукции, на экваторе индукция обращается в ноль.

Рассмотрим движение линейного проводника в неоднородном магнитном поле, моделирующем распределение компоненты B_y (рис. 7). Допустим, что проводник случайно повернулся на малый угол, как показано на рис. 7 а. Тогда результирующая сила, действующая на него, будет

направлена влево и он слегка сместится туда, как показано штриховой линией. В результате левая часть его попадает в область более слабого поля, следовательно, на правую часть будет действовать большая сила, поворачивающая его дальше, в ту же сторону. Такое движение проводника будет неустойчивым. Если же такое же смещение произойдет в поле, распределение которого показано на рис. 7 б, то левая часть проводника попадает в область более сильного поля, и на нее будет действовать большая сила, возвращающая проводник в прежнее положение – движение проводника будет устойчивым. При движении магнита по проводнику по третьему закону Ньютона равная сила будет действовать на него со стороны проводника. Но поскольку масса проводника значительно больше массы магнита, то поворачиваться будет магнит.

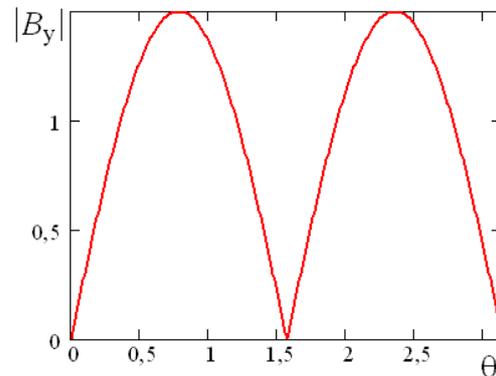


Рис. 6. Зависимость модуля у-компоненты магнитной индукции магнитного диполя в единицах kp_m/r^3 от полярного угла в радианах

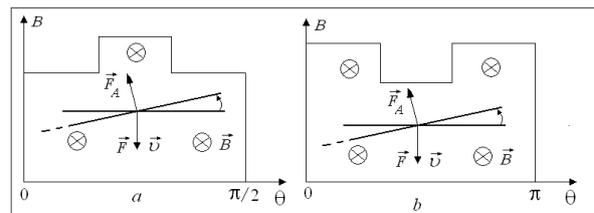


Рис. 7. Объяснение устойчивого и неустойчивого движения проводника в неоднородном магнитном поле

4. Заключение

Таким образом, проделанные эксперименты с неодимовыми магнитами в виде цилиндрических таблеток диаметром 12 мм с направляющей пластиной показали, что скорость их скольжения по наклонной проводящей поверхности существенно зависит от взаимной ориентации векторов магнитного момента и скорости. Она в 1.8–1.9 раза больше при взаимно перпендикулярной ориентации, чем при параллельной (антипараллельной) для

магнита толщиной 6 мм, и в 3 раза больше для магнита толщиной 1.5 мм. Оказалось также, что движение магнита без направляющей пластины неустойчиво при параллельной ориентации векторов скорости и магнитного момента – они самопроизвольно разворачиваются так, чтобы эти векторы были бы взаимно перпендикулярны. При падении магнитов в трубе этот эффект практически не проявляется, однако проявляется другой эффект – разворот магнитов магнитным полем Земли, так что они падают всегда северным полюсом вниз.

Список литературы

1. Саранин В. А., Кельдышев Д. А., Иванов Ю. В. Применение робототехнических наборов в физических экспериментах // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 9 (63). С. 92–96.
2. Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. С. 409.
3. Князев Б. А., Котельников И. А., Тютин А. А., Черкасский В. С. Торможение магнитного диполя, движущегося с произвольной скоростью в проводящей трубе // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 9. С. 965–974.

4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1967. 460 с.
5. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 488 с.
6. Куликов К. А., Сидоренков Н. С. Планета Земля. М.: Наука, 1977. 192 с.

References

1. Saranin V. A., Keldyshev D. A., Ivanov Yu. V. Application of robotical sets in physical experiments. *International Research Journal*, 2017, no. 9 (63), pp. 92–96 (In Russian).
2. Smythe W. *Static and Dynamic Electricity*, New York: McGraw-Hill, 1950, p. 409.
3. Knyazev B. A., Kotelnikov I. A., Tyutin A. A., Cherkasskii V. S. Braking of a magnetic dipole moving with an arbitrary velocity through a conducting pipe. *Physics – Uspekhi*, 2006, vol. 49, pp. 937–946.
4. Landau L. D., Lifshits E. M. *The Classical Theory of Fields*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1980, 402 p.
5. Govorkov V. A. *Elektricheskie i magnitnye polya* (Electrics and magnetic fields). Moscow: Energiya, 1968, 488 p. (In Russian)
6. Kulikov K. A., Sidorenkov N. S. *Planeta Zemlya* (Planet Earth. Moscow: Nauka, 1977, 192 p. (In Russian)

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Саранин В. А. Экспериментальное исследование движения магнитного диполя по проводящей поверхности // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 3 (37). С. 48–53. doi: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53

Please cite this article in English as:

Saranin V. A. Experimental research of movement of a magnetic dipole on a conducting surface. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 3(37), pp. 48–53. doi: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53