

УДК 53.082.782

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ЛОКАЦИИ

© 2020 г. В. С. Шевцов^{1, 2, *}, Н. Е. Кулезнев¹, П. А. Поляков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vs.shevtcov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 30.08.2019 г.

После доработки 16.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

В работе предложен метод измерения магнитного поля, основанный на методе магнитной локации, с использованием ферромагнитного шарика в качестве зонда. На основе экспериментальных данных рассчитана поправка к коэффициенту пропорциональности между измеренными значениями намагниченности шарика и внешнего магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676520020374

ВВЕДЕНИЕ

Методика измерения магнитных полей – важный раздел экспериментальной физики [1]. Стандартный способ измерения магнитного поля в данной точке пространства сводится к размещению щупа с датчиком в интересующую область пространства. В этих случаях датчики контактируют с проводниками, передающими сигналы измерения на обрабатывающее устройство. В данной работе удалось разработать новый метод измерения магнитного поля с помощью метода магнитной локации [2–4]. Экспериментально метод был опробован на измерении магнитного поля однородно намагниченного магнита в форме прямоугольного параллелепипеда, для которого имеется общее аналитическое решение [5].

РАСЧЕТ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО ШАРИКА

В данной статье предлагается новый способ измерения индукции магнитного поля посредством помещения в исследуемую область пространства ферромагнитного стального шарика. Под воздействием магнитного поля шарик намагничивается и приобретает магнитный момент, который в отсутствие магнитной анизотропии в данном материале направлен вдоль вектора индукции внешнего магнитного поля.

Связь напряженности магнитного поля \vec{H} , индукции \vec{B} и намагниченности \vec{I} в ферромагнетике имеет следующий вид [6]

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{I}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн · м⁻¹ – магнитная постоянная.

Если ферромагнетик, помещенный во внешнее поле напряженностью \vec{H}_0 , имеет форму шара, то напряженность магнитного поля \vec{H} внутри ферромагнетика определяется следующим выражением [6]:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 - \frac{1}{3}\vec{I}(\vec{H}), \quad (2)$$

где $\vec{I}(\vec{H})$ – намагниченность шарика.

Из (1) и (2) следует, что

$$\vec{H} = \vec{H}_0 - \frac{1}{3}\left(\frac{\vec{B}(\vec{H})}{\mu_0} - \vec{H}\right), \quad (3)$$

$$\vec{H}_0 = \vec{H} + \frac{1}{3}\left(\frac{\vec{B}(\vec{H})}{\mu_0} - \vec{H}\right) = \frac{2}{3}\vec{H} + \frac{1}{3}\frac{\vec{B}(\vec{H})}{\mu_0}. \quad (4)$$

Графическая зависимость модуля вектора индукции магнитного поля от величины напряженности магнитного поля для стали [6] была оцифрована, а полученные данные были подставлены в формулу (4). Это позволило вычислить зависи-

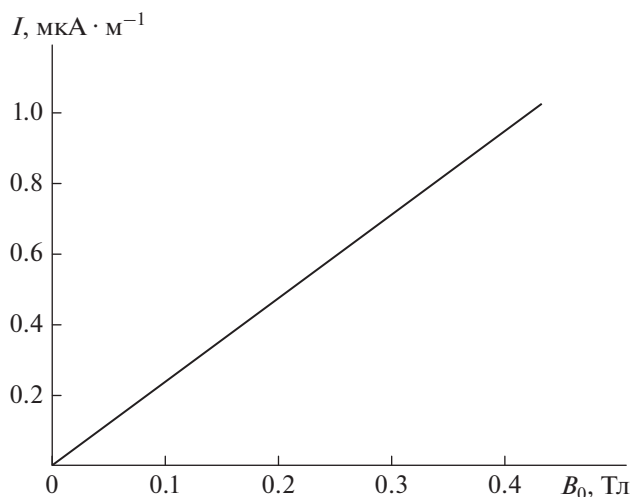


Рис. 1. График зависимости модуля намагниченности I от модуля индукции внешнего магнитного поля B_0 .

мость $\vec{H}_0 = \vec{H}(\vec{H})$. Подставляя данный результат в формулу (2), получим связь вектора намагниченности \vec{I} и напряженности внешнего поля \vec{H}_0 в следующем виде:

$$\vec{I} = 3(\vec{H}_0 - \vec{H}(\vec{H}_0)). \quad (5)$$

На рис. 1 представлен график зависимости величины вектора намагниченности \vec{I} от величины индукции внешнего магнитного поля $\vec{B}_0 = \vec{H}_0\mu_0$. Видно, что этот график в рассматриваемом диапазоне с высокой точностью является линейным с тангенсом угла наклона равным $3/\mu_0$. Относительная ошибка отклонения от этой линейной зависимости не превышает одной десятой процента. Физически это означает, что в данном диапазоне полей эффективная относительная магнитная проницаемость является очень большой и принимает значения от 10^3 до 10^4 . Поэтому при внесении шарика во внешнее магнитное поле \vec{H}_0 в шарике индуцируется размагничивающее поле, равное $\frac{1}{3}\vec{I}$, отличающееся от \vec{H}_0 на величину порядка 0.1–0.01%.

Таким образом, с высокой точностью мы можем считать, что

$$\vec{H}_0 \approx \frac{1}{3}\vec{I}(\vec{H}), \quad (6)$$

$$\vec{I} = \frac{3\vec{B}_0}{\mu_0}. \quad (7)$$

Так как магнитный дипольный момент ферромагнетика связан с его намагниченностью как

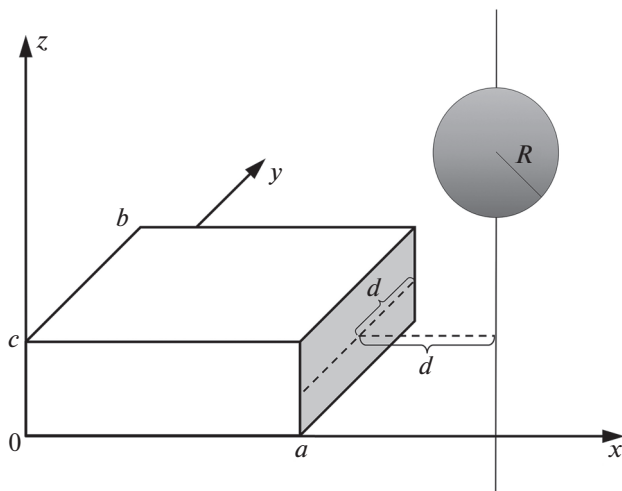


Рис. 2. Конфигурация экспериментальных измерений. Шарик намагничивается полем постоянного прямоугольного магнита. Линия параллельна оси Oz , $d = b/2 = 20$ мм, $R = 13.5$ мм.

$\vec{p} = \vec{I} \cdot V$, где V — объем этого ферромагнетика, то получаем

$$\vec{B}_0 = \frac{\mu_0 \vec{p}}{3V}. \quad (8)$$

Тогда формула (2) примет вид:

$$\mu_0 \vec{I} = \mu_0 \frac{\vec{p}}{V} = 3\vec{B}_0. \quad (9)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальных исследований был взят однородно намагниченный постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $40 \times 40 \times 15$ мм и стальной шарик радиусом $R = 13.5$ мм. Шарик был помещен сбоку от магнита на расстоянии $d = b/2$ от его центра до боковой грани магнита и перемещался вдоль прямой, параллельной оси z , с шагом $\Delta z = 5$ мм (рис. 2).

Шарик намагничивался внешним магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом, и при перемещении шарика вдоль вертикально направленной прямой измерялись проекции на оси x , y и z его магнитного дипольного момента специальным прибором (магнитостатическим локализатором [2–4]). В соответствии с формулой (6) были построены зависимости проекции намагниченности стального шарика \vec{I} , умноженной на магнитную постоянную μ_0 , от значений проекции индукции внешнего магнитного поля \vec{B}_0 , создаваемого постоянным магнитом. Полученные экс-

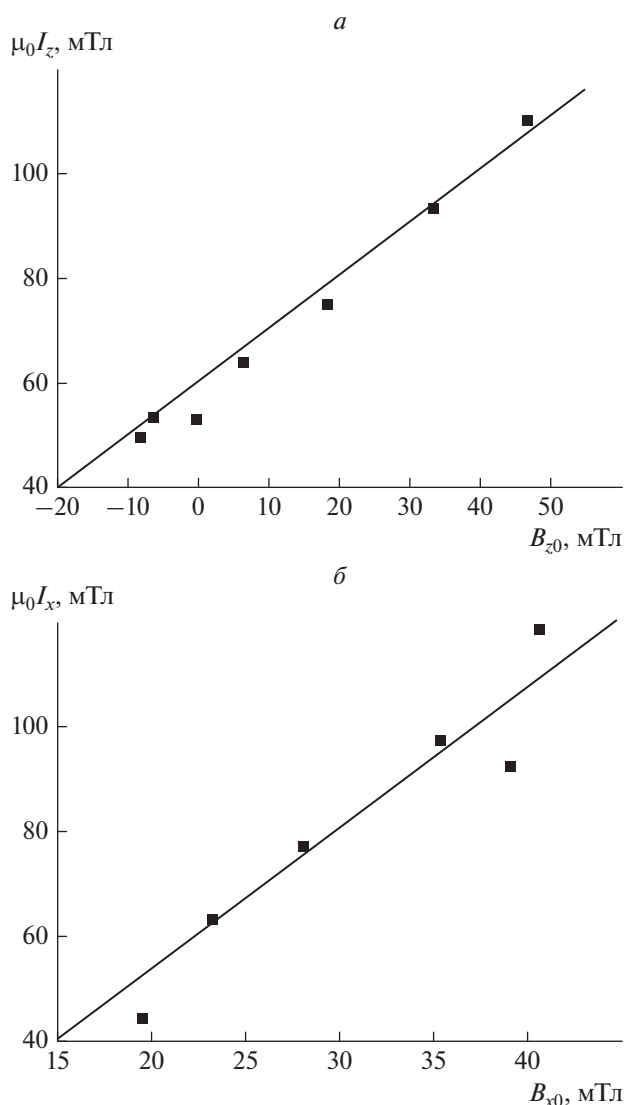


Рис. 3. Зависимость произведения проекции на ось z (а) и на ось x (б) вектора намагниченности стального шарика \vec{I} на магнитную постоянную μ_0 от проекции индукции внешнего магнитного поля \vec{B}_0 на ось z (а) и на ось x (б). Прямой линией обозначена аппроксимация МНК, ■ – экспериментальные точки.

периментальные данные были обработаны методом наименьших квадратов для пропорциональной зависимости.

Согласно формуле (6), полученный методом наименьших квадратов коэффициент пропорциональности $k = \frac{\mu_0 \vec{I}}{\vec{B}_0}$ должен быть равен 3. Однако поле в пределах шарика неоднородно, поэтому к

коэффициенту k необходима поправка. По результатам обработки экспериментальных результатов для проекций на оси x (рис. 3а) и z (рис. 3б) векторов \vec{I} и \vec{B}_0 были получены соответственно $k_x = 2.68 \pm 0.08$ и $k_z = 2.54 \pm 0.15$.

Проведенный эксперимент показывает, что коэффициент пропорциональности между величинами намагниченности шарика и внешнего магнитного поля имеет значение меньше 3, что объясняется неоднородностью поля в пределах объема шарика.

Таким образом, при наличии магнитостатического локатора можно бесконтактным способом измерять индукцию магнитного поля в области нахождения стального шарика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был разработан новый метод измерения магнитного поля с помощью ферромагнетика в форме шара. Из экспериментальных измерений удалось получить реальную зависимость исследуемого внешнего магнитного поля от магнитного дипольного момента помещенного в это поле стального шарика, что позволяет определять индукцию этого внешнего магнитного поля, измеряя дипольный момент стального шарика магнитостатическим локатором. Предложенный метод пригоден для измерения индукции магнитного поля в средах, недоступных для измерения традиционными магнитометрами (агрессивные жидкости, низкие и высокие температуры и т.д.).

Данная работа была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чечерников В.И.* Магнитные измерения. М.: МГУ, 1969. 387 с.
2. *Касаткин С.И., Поляков О.П., Поляков П.А. и др.* // Датчики и системы. 2005. № 8. С. 33.
3. *Артамонов Е.И., Балабанов А.Б., Касаткин С.И. и др.* // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 2.
4. *Касаткин С.И., Плотникова Н.В., Поляков О.П. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 1085; *Kasatkin S.I., Plotnikova N.V., Polyakov O.P. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 983.
5. *Кулезнев Н.Е., Поляков П.А., Шевцов В.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 1076; *Kuleznev N.E., Polyakov P.A., Shevtsov V.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 974.
6. *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. М.—Л.: ГИИЛ, 1948. 542 с.