

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

(017):538

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ СИ В МАГНЕТИЗМЕ<sup>\*</sup>*****Л. Бейтс***

Заметка посвящена применению системы единиц СИ для описания магнитных свойств вещества, в особенности материалов для постоянных магнитов. Показано, что не возникает существенных трудностей при выражении классических и современных представлений о магнетизме с помощью единиц системы СИ.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В статье «Электрические и магнитные единицы системы СИ» Д. Смит<sup>1</sup> провел очень полезное обсуждение единиц СИ и влияния их применения на преподавание соответствующих глав курса физики в средних и высших учебных заведениях. Важно рассмотреть также результаты использования этих единиц в некоторых областях прикладной физики. На симпозиуме группы магнетизма Физического института и Физического общества 16 декабря 1969 г., посвященном обсуждению вопроса о преподавании магнетизма, Э. Спеллинг из Исследовательских лабораторий Муллард прочитал интересный доклад на тему «Единицы системы СИ в технологии магнитов», с которым я познакомился с большим интересом.

В настоящей заметке я хотел бы высказать соображения об использовании системы СИ в физике магнетизма с несколько иных позиций, руководствуясь опытом лектора и исследователя, в течение многих лет изучающего ферромагнитные материалы, имеющие столь важные применения. До сих пор значительное большинство исследователей пользовалось почти исключительно нерационализированной системой единиц СГС, особенно при описании магнитных свойств атомов, ионов и ядер, и надо признать, что в этих разделах физики применять единицы системы СГС весьма удобно. Однако в связи с ожидаемым широким распространением системы СИ в промышленности целесообразно изучить, как наилучшим образом можно ввести в эту систему старые классические представления о магнетизме.

**2. ТРАДИЦИОННОЕ ОПИСАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА**

Всем нам знакомо описание процесса намагничивания с помощью полости в магнетике, позволяющее без особого труда усвоить представления о напряженности магнитного поля  $H$ , его индукции  $B$  и векторах магнитных моментов  $I$  или  $M$  (на единицу объема) либо  $\sigma$  (на единицу массы вещества). Предположим, что длинный стержень из ферромагнитного материала (рис. 1), магнитные характеристики которого требуется

<sup>\*</sup>) L. F. Bates. The Introduction of SI in Magnetism, Contemp. Phys. **11** (3). 301 (1970). Перевод В. И. Рыдника, под редакцией и с примечаниями К. Н. Барабанского.

определить, целиком введен в длинный соленоид, по которому идет постоянный ток, и примем, что на стержень действует намагничивающее поле, напряженность которого известна из величины тока и параметров соленоида и выражена в единицах СГС, т. е. эрстедах. Даже сегодня мы можем не смущаясь представлять себе поверхностью намагниченные листки или воображаемые магнитные полюсы на концах стержня и считать, что они вызывают размагничивание стержня, если стержень недостаточно длинный. Эффекты размагничивания меняются по длине стержня конечной длины; сегодня совершенно забыта работа Дусслера<sup>2</sup>, который показал, как нужно измерять действительное размагничивающее

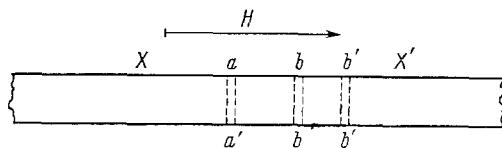


Рис. 1. Намагничивание стержневого образца.

поле, скажем, в области  $XX'$  стержня конечной длины (см. рис. 1), помещенного в поле напряженностью  $H_S$ , создаваемое длинным соленоидом.

Поле  $H$ , существующее в области  $XX'$ , обычно записывается в виде

$$H = H_S - DI \quad \text{или} \quad H = H_S - NI,$$

где  $I$  (или  $M$ ) — магнитный момент единицы объема материала стержня, а  $D$  (или  $N$ ) называется фактором размагничивания в области  $XX'$ .

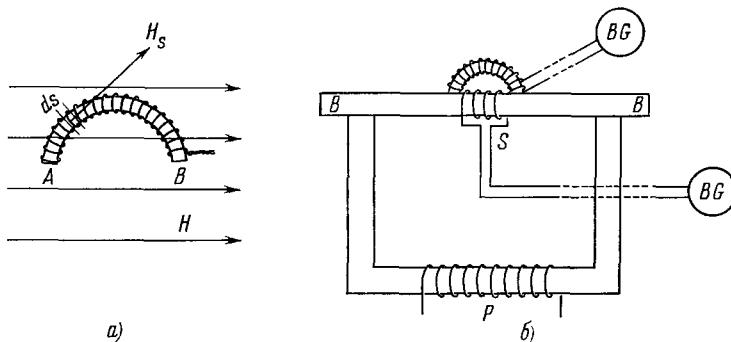


Рис. 2. Магнитный потенциометр.

Поскольку во многих случаях можно непосредственно определить напряженность поля  $H$  магнитным потенциометром \*) и соответствующую индукцию  $B$  с помощью измерительной катушки, можно считать, что мы получаем соответствующие данные о значениях  $H$  и  $B$  в области  $XX'$

\*) Магнитным потенциометром автор называет разновидность пояса Роговского. В отличие от последнего обмотка магнитного потенциометра заполняет боковую поверхность твердого диэлектрического полукольца небольших размеров (3—5 см) и подключается к баллистическому гальванометру  $BG$  (рис. 2). Торцы полукольца расположены в одной плоскости, тщательно отшлифованы и могут прижиматься к шлифованным поверхностям исследуемых материалов. Быстрое удаление потенциометра из поля вызывает отклонение гальванометра, пропорциональное средней величине напряженности магнитного поля в исследуемой области магнетика. (Предварительно потенциометр градуируется в известном поле соленоида с током.) Кроме книги автора<sup>3</sup>, применения магнитного потенциометра описаны в работах<sup>9\*, 10\*</sup>. (Прим. ред.)

стержня при этих условиях эксперимента. Поэтому для наших целей нет нужды усложнять описание процесса намагничивания, вводя размагничивающее поле.

Величину  $H$ , как уже сказано, можно найти с помощью магнитного потенциометра; к сожалению, однако, во многих учебных лабораториях этот прибор неизвестен. Применение магнитного потенциометра осложняется тем, что для его использования требуется изготовление стержней с хорошими плоскими поверхностями, поскольку принимается, что тангенциальные компоненты поля должны быть одинаковыми по обе стороны поверхности. Используя рассматриваемое ниже в системе СИ понятие плотности внешнего магнитного потока  $B_0$ , легко понять, что с помощью потенциометра можно измерить и эту величину  $B_0 = \mu_0 H$ , где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума (см. ниже).

Теперь мы должны вкратце остановиться на понятии магнитной индукции  $B$ . В течение многих лет ограничивались ее рассмотрением как поля, которое должно существовать в узкой полости в образце (например,  $aa'$  на рис. 1) и которое в принципе можно измерить по силе, испытываемой проводником с током, помещенным в эту щель, или же по отклонению пучка электронов, движущихся в щели параллельно направлению  $aa'$ . Тогда можно записать

$$B = H + 4\pi I \quad (\text{или } B = H + 4\pi M),$$

используя единицы системы СГС; при этом величины  $B$ ,  $H$  и  $I$  (или  $M$ ) имеют одинаковую размерность. Удобно также писать

$$B = \mu H = H + 4\pi I$$

или

$$\mu - 1 = \frac{4\pi I}{H} = 4\pi \chi,$$

где  $\mu$  называлось магнитной проницаемостью области  $XX'$  стержня, а  $\chi$  — его объемной магнитной восприимчивостью, причем  $\mu$  и  $\chi$  были безразмерными величинами.

Далее, следует сделать ряд замечаний в отношении величины  $I$ . Этот вектор, как видно из предыдущего, рассматривали как величину, пропорциональную напряженности магнитного поля, возникающего в результате появления магнитных зарядов на поверхности по обе стороны щели. Если рассмотреть небольшой отрезок стержня  $bb'$ , заключенный между двумя узкими щелями, то величина момента пары сил, который надо приложить, чтобы повернуть этот отрезок на небольшой угол вокруг оси, перпендикулярной направлению  $H$ , должна составлять  $[IB]$  на единицу объема отрезка стержня, поскольку магнитная энергия на единицу объема отрезка равна  $-(IB)$ , что и позволяет рассматривать  $I$  как магнитный момент единицы объема данного материала в условиях этого эксперимента.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ РАССМОТРЕННЫХ ВЫШЕ ВЕЛИЧИН К ОПИСАНИЮ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Теперь рассмотрим некоторые вопросы, встающие перед изготовителем или потребителем материалов для постоянных магнитов. Обычно имеют дело с малыми стержневыми постоянными магнитами (как, например, участок  $XX'$  на рис. 1), располагаемыми в магнитной цепи, например между полюсами магнитного ярма, поле в котором возбуждается током в катушке, намотанной на ярмо. Изменения индукции  $B$  можно

определить с помощью измерительной катушки, намотанной на отрезок стержня  $XX'$  и последовательно соединенной с флюксметром, а соответствующие изменения  $H$  (или  $\mu_0 H$ ) — с помощью магнитного потенциометра. Описания измерительной процедуры можно найти в литературе (<sup>3</sup>, стр. 85; <sup>4</sup>, стр. 56). (Самые современные сведения о принятых в промышленности методах магнитных измерений можно найти в готовящемся к выходу в свет сборнике <sup>5</sup>.)

Таким образом, в принципе нет затруднений в нахождении величин  $B$  и  $H$ ; их взаимную зависимость можно изобразить графически в координатах  $B$ ,  $H$  или  $4\pi I$ ,  $H$ . На рис. 3 приведен такой график <sup>6</sup>, который может представлять интерес для потребителей ферромагнитных материалов; при его построении использованы единицы СГС. Поучительно строить зависимости  $B$  от  $H$  и  $4\pi I$  от  $H$  на одном и том же чертеже; это позволяет иллюстрировать тот факт, что в случае очень жесткого магнитного материала коэрцитивная сила  $|_I H_c|$ , определенная из графика для  $4\pi I$ , больше, чем сила  $|_B H_c|$ , найденная из графика для  $B$ . Изготовитель обычно приводит значение второй из них; она часто на несколько десятков и даже сотен эрстед меньше соответствующего значения  $|_I H_c|$ . Например, для сплава Co — Pt, для которого  $_B H_c = -1040 \text{ э}$ , значение  $4\pi I = -_B H_c = +1040 \text{ гс}$ , и для устранения этой остаточной намагниченности тре-

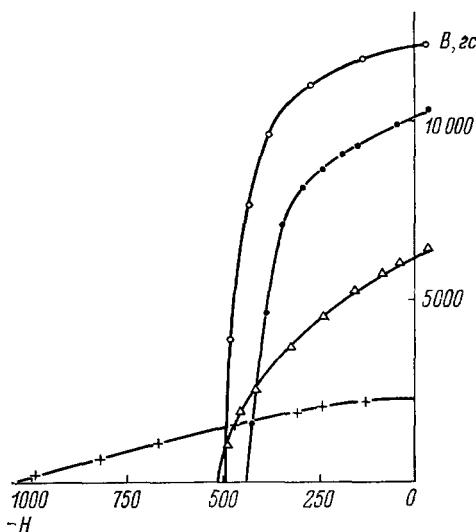


Рис. 3. Кривые размагничивания материалов для постоянных магнитов:  
○ — альнико (тиконол), Δ — спеченный альнико,  
● — алькомакс + Co — Pt;  $H$  в ед. [ $\text{э}$ ].

буется приложить дополнительное поле. Между прочим, величина  $4\pi I$  иногда в инженерной среде называется удельной намагниченностью; это неудачно, поскольку термин «удельный» следовало бы резервировать за соответствующей величиной, отнесенной к единице массы, а не к единице объема материала (см. доклад Королевского общества, 1969 г.). На рис. 3 использование различных единиц измерения просто указывает на различие способов определения и измерения величин  $B$  и  $H$ .

#### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНИЦ СИСТЕМЫ СИ

Обратимся теперь к использованию единиц системы СИ. Полезно, не боясь повториться, снова записать уравнения

$$B = H + 4\pi I \quad (1)$$

для нерационализированной системы СГС,

$$B = H + I \quad (2)$$

для рационализированной системы СГС и соответствующие уравнения:

$$B = \mu H = (1 + 4\pi \chi) H, \quad (3)$$

$$B = \mu H (= \mu_r H) = (1 + \chi) H, \quad (4)$$

где мы пока еще используем символ  $\chi$ , которым до недавнего времени было принято обозначать объемную магнитную восприимчивость материала. Поскольку  $\mu$  (или  $\mu_r$ ) есть величина безразмерная, то  $\mu = 1$  должна быть безразмерной постоянной для ферромагнитного материала при данномложенном поле и прочих заданных условиях.

При использовании системы СИ можно писать либо

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 (H + I), \quad (5)$$

где

$$\mu_r = 1 + \frac{I}{H},$$

либо

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 H + J, \quad (6)$$

где

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H}.$$

Здесь  $\mu_0$  есть магнитная проницаемость вакуума, строго определенная следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ дж.сек}^2/\text{к}^2\text{м} = \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ дж/а}^2 \cdot \text{м} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ в.сек}/\text{а} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (6a)$$

(В системе СИ единицей напряженности магнитного поля является ампер на метр,  $1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}$ , а единицей плотности магнитного потока — тесла,  $1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс} = 1 \text{ в.сек}/\text{м}^2 = 1 \text{ вб}/\text{м}^2 = 1 \text{ дж/а.м}^2$ .)

Кроме того, из уравнения (5) видно, что намагничение  $I$  выражено в тех же единицах, что и  $H$ , что соответствует соглашению, принятому Международным союзом чистой и прикладной физики и Международным союзом чистой и прикладной химии, и включено в доклад Королевского общества о символах, единицах и их сокращенных обозначениях (1969 г.). Из уравнения (6) видно, что магнитная поляризация  $J$  имеет ту же раз мерность, что и магнитная индукция  $B$ . Символ  $J$  употреблялся теми, кто до сих пор пользовался системой единиц Джорджи (см. <sup>6</sup> и <sup>4</sup>), они же употребляли символ  $I$  вместо  $J$  в уравнении (6), называя его намагничением. Читатели современных книг по магнетизму должны с самого начала выяснить, какой смысл вкладывают авторы в употребляемые ими символы  $J$  или  $I$ . Отношение  $I/H = J/\mu_0 H$  есть объемная магнитная восприимчивость; по международному соглашению она обозначается как  $\chi_m$ . Выбор такого обозначения несколько неудачен, поскольку в течение многих лет исследователи, особенно те из них, кто имел дело со слабо магнитными материалами, использовали этот символ для обозначения массовой магнитной восприимчивости  $\chi_m = \frac{\chi}{\rho}$ , где  $\rho$  — плотность материала. Смит <sup>1</sup> обратил внимание на преимущества использования обозначения  $\chi_m$  для молярной магнитной восприимчивости.

Для дальнейшего примем, что стержень из однородного ферромагнитного материала (см. рис. 1) внесен в измеряемое магнитное поле  $H$  (или во внешний магнитный поток с плотностью  $B_0 = \mu_0 H$ ). Допустим, что с помощью флюксметра или магнитного потенциометра мы определили значения  $B$ ,  $H$ ,  $I$  для участка стержня  $XX'$  на рис. 1. Предположим, что стержень изготовлен из материала, магнитная индукция которого имеет в верхней правой части кривой намагничивания разумное значение  $B = 13\ 000 \text{ гс}$  при  $H = 200 \text{ э}$ . Тогда по уравнениям (1) и (2) находим

$$B = 13\ 000 \text{ гс} = 200 + 4\pi I \text{ э}, \quad (1a)$$

$$B = 13\ 000 \text{ гс} = 200 + I \text{ э}. \quad (2a)$$

Эти уравнения имеют смысл только, если принять, что здесь единицы гаусс и эрстед используются для магнитных полей, измеренных разными методами; в рамках классической модели «силовых линий» в этих уравнениях нет ничего противоречивого. Оба уравнения (1а) и (2а) дают  $\mu - 1 = \mu_r - 1 = 64$ .

Используя систему СИ, из уравнения (5) с учетом значения  $\mu_0$  из (6а) имеем

$$B = 13000 \cdot 10^{-4} \text{ м.н} = \mu_0 \cdot 200 \cdot \frac{10^3}{4\pi} \frac{a}{m} + \mu_0 I$$

или

$$13000 \cdot 10^{-4} \text{ м.н} = 200 \cdot 10^{-4} \text{ м.н} + \mu_0 I,$$

откуда

$$\mu_0 I = 1,28 \text{ м.н} = 1,28 \text{ дж/а} \cdot \text{м}^2$$

и

$$I = 1,28 \frac{\text{док}}{\text{а} \cdot \text{м}^2} / 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{в.сек}}{\text{а} \cdot \text{м}} = \frac{1,28}{4\pi} \cdot 10^7 \frac{a}{m} = 1,02 \cdot 10^6 \frac{a}{m},$$

$$\mu_r - 1 = 12800 \cdot 10^{-4} \text{ м.н}/200 \cdot 10^{-4} \text{ м.н} = 64.$$

Из уравнения (6) имеем

$$13000 \cdot 10^{-4} \text{ м.н} = \mu_0 \cdot 200 \cdot \frac{10^3}{4\pi} \frac{a}{m} + J,$$

откуда

$$J = 1,28 \text{ м.н} \quad \text{и} \quad \mu_r - 1 = 64.$$

Ранее, когда использовались единицы нерационализированной системы СГС, при построении графиков зависимостей  $B$ ,  $B - H$  или  $4\pi I$  от  $H$  по осям координат было удобно откладывать величины  $10^4 \text{ гс}$  (ординаты) и  $10^2 \text{ э}$  (абсциссы). Теперь же, используя единицы системы СИ, по оси ординат удобно откладывать  $B$  в  $\text{тл}$ , либо  $I$  в  $10^5 \text{ а/м}$ , либо  $J$  в  $\text{тл}$ , а по оси абсцисс во всех этих случаях  $H$  в  $10^4 \text{ а/м}$ . Сегодня некоторые авторы предпочитают строить графики зависимости  $B$  или  $B - B_0$  от  $B_0$ , где  $B$  — измеренная плотность магнитного потока; величина  $B_0$  называется плотностью внешнего магнитного потока; разность  $B - B_0$ , конечно, равна

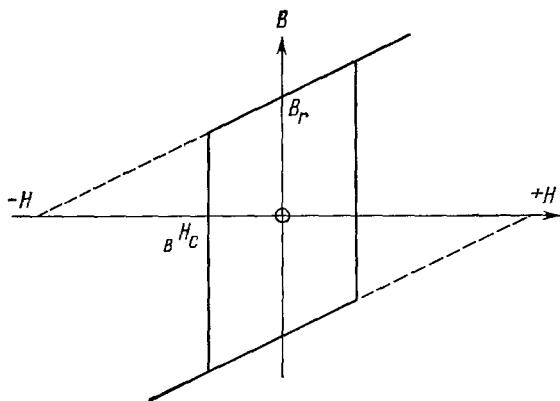


Рис. 4. «Прямоугольная» петля гистерезиса идеального материала для постоянных магнитов.

магнитной поляризации  $J$ ; при построении упомянутых графиков по обеим осям тогда используются единицы тесла.

Следует сделать замечание по поводу величины  $(BH)_{\max}$ , находимой из графика  $BH$  в зависимости от  $H$ . Эта величина есть мера наибольшей магнитной энергии, которую можно запастись в единице объема ферромагнитного материала; ее также называют критерием Эвершеда пригодности данного материала для использования в магнитных цепях, содержащих постоянные магниты<sup>3, 7</sup>. В системе СГС эта величина выражается в единицах  $\text{гс} \cdot \text{э/см}^3 = \text{эр/см}^3$ ; в системе СИ она выражается в единицах  $(\text{в.сек}/\text{м}^2)(\text{а/м}) = \text{дж/м}^3$ .

Проиллюстрируем вычисление количества тепла  $W$ , рассеивающегося за один цикл перемагничивания, на простом примере. Для этого возьмем материал с идеальной «прямоугольной» петлей гистерезиса (рис. 4), для которого коэрцитивная сила  $|{}_B\mathbf{H}_c| = 200$  э и остаточная намагниченность  $B_r = 12\,000$  гс. В системе единиц СГС

$$W = 4 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot 200 \text{ э} \cdot 12\,000 \text{ гс} = \frac{9,6}{4\pi} \cdot 10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3},$$

в системе СИ

$$W = 4 \cdot 200 \cdot \frac{10^8}{4\pi} \frac{\text{а}}{\text{м}} \cdot 12\,000 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = \frac{9,6}{4\pi} \cdot 10^5 \frac{\text{дж}}{\text{м}^3}.$$

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для практических расчетов при переводе из системы СГС в систему СИ и обратно нужно запомнить только, что  $1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс}$  и  $1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}$  (т. е.  $1 \text{ э} = 79,6 \text{ а/м}$ ). Исследователям магнетизма без сомнения нужна свобода в выборе единиц измерения. В течение еще многих лет для чтения огромной литературы по магнетизму, в том числе и современных статей о приложениях теории магнетизма в атомной и ядерной физике, нужно будет знать систему СГС. Цель настоящей заметки состояла в том, чтобы показать, что при описании и измерении магнитных свойств макроскопических тел использование системы СИ не вызывает заметных затруднений, вопреки опасениям еще многих исследователей.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА \*)

1. D. H. Smith, Contemp. Phys. **11**, 287 (1970).
2. F. Dussler, Ann. Phys. Lpz. **86**, 66 (1928).
3. L. F. Bates, Modern Magnetism (4th Ed.), Cambridge University, 1963.
4. H. Jijlstra, Experimental Methods in Magnetism, vol. 9, 2, p. 56, Selected Topics in Solid State Physics, Amsterdam; North-Holland Co., 1967.
5. Proceedings II European Conf. on Hard Magnetic Materials, Milan, 1969.
6. S. Chikazumi, Physics of Magnetism, London John Wiley & Sons, 1964.
7. R. S. Tebble, D. J. Crampton, Magnetic Materials, John Wiley & Sons, 1969.
8. L. F. Bates, Phil. Mag., Series 7, **36**, 297 (1945).
- 9\*. L. F. Bates, B. Lloyd - Evans, Proc. Phys. Soc. **45**, 425 (1933).
- 10\*. L. F. Bates, F. E. Neale, Proc. Phys. Soc. **63A**, 374 (1950).

---

\*) Литература, отмеченная звездочкой, добавлена редактором перевода.  
(Прим. ред.)