

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

Московский физико-технический институт

(государственный университет)

Кафедра общей физики

**ИЗМЕРЕНИЕ  
МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Лабораторная работа № 51

по курсу Общая физика

МОСКВА 2012

**В работе используются:** источник питания, двойное Ш-образное ярмо, набор образцов из ферромагнитных материалов, баллистический гальванометр, осветитель со шкалой, потенциометр, ключи, миллиамперметр, ваттметр, катушка для размагничивания образцов.

Магнитные свойства веществ удобно исследовать, располагая изготовленные из них образцы в зазоре электромагнита, как это изображено на рис. 1. Магнитный поток, возбуждаемый катушкой  $L$ , проходит по ярму, пронизывает зазор и помещённый в нём образец. Образец плотно соприкасается своими торцами с полюсами электромагнита. Ярмо электромагнита изготовлено из магнитомягкой стали с высокой магнитной проницаемостью.

Рассмотрим теорию магнитного ярма. Заметим прежде всего, что напряжённости магнитного поля в образце, помещённом в зазор электромагнита, и в самом воздушном зазоре равны между собой. Отмеченное равенство следует из граничных условий для вектора  $\mathbf{H}$  (равенство тангенциальных составляющих на границе двух сред).

Сравним теперь напряжённости магнитного поля в зазоре и в железе ярма. Обозначим напряжённость поля в ярме через  $H_0$  и напряжённость поля в зазоре через  $H_1$ . Пусть сечение ярма равно  $S_0$ , а сечение образца —  $\sigma$ , магнитная проницаемость ярма равна  $\mu_1$  и магнитная проницаемость образца —  $\mu_2$ . Из условия непрерывности магнитного потока на границе зазора имеем

$$H_1(S_0 - \sigma) + \mu_2 H_1 \sigma = \mu_1 H_0 S_0. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует

$$\frac{H_0}{H_1} = \frac{(S_0 - \sigma) + \sigma \mu_2}{S_0 \mu_1}. \quad (2)$$

В правильно сконструированном электромагните сечение ярма во много раз превосходит сечение образца. Знаменатель (2) при этом существенно больше числителя, так что  $H_0 \ll H_1$ . Напряжённость магнитного поля в ярме электромагнита оказывается, таким образом, невелика.

Формула (2), строго говоря, определяет напряжённость поля не во всём ярме электромагнита, а только вблизи зазора. Из-за потоков рассеяния поле в середине ярма оказывается обычно в  $1,5 \div 2$ , а иногда в 3 раза больше, чем

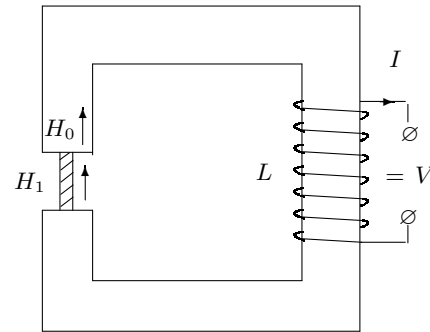


Рис. 1. Образец в зазоре электромагнита

$H_0$ , рассчитанное по (2). Введение поправок на поток рассеяния не меняет, однако, нашего основного вывода о том, что напряжённость магнитного поля в ярме мала по сравнению с напряжённостью в зазоре.

Найдём связь между напряжённостью поля  $H_1$  и силой тока, протекающего через катушку. Для установления этой связи воспользуемся формулой, определяющей циркуляцию вектора  $\mathbf{H}$ :

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} NI, \quad (3)$$

где  $I$  — сила тока, а  $N$  — число витков, охватываемых контуром, по которому вычисляется циркуляция. Выберем путь интегрирования через зазор и вдоль ярма. Число витков, охватываемых контуром, равно в этом случае числу витков в катушке.

Как было выяснено выше, напряжённость поля в ярме невелика, так что составляющей циркуляции, взятой вдоль ярма, в первом приближении можно пренебречь. Считая напряжённость поля вдоль зазора постоянной (это можно делать в том случае, если диаметр полюсов больше, чем ширина зазора), найдём

$$H_1 l = \frac{4\pi}{c} NI, \quad (4)$$

где  $l$  — длина зазора.

Благодаря тому, что напряжённость магнитного поля оказывается велика только в зазоре электромагнита, магнитное ярмо позволяет сравнительно дешёвыми средствами достигать напряжённостей  $\sim 10^4$  Э (при больших полях железо начинает сильно насыщаться, и ярмо становится неэффективным). В этом состоит одно из важнейших преимуществ опытов с магнитным ярмом.

Отметим также, что в присутствии ярма существенно улучшаются условия намагничивания у краев образца. Это более сильно сказывается на коротких ферромагнитных образцах, в которых размагничивающее влияние концов особенно велико.

**Экспериментальная установка** для исследования магнитных свойств ферромагнетиков с помощью двойного ярма представлена на рис. 2.

Ярмо прибора состоит из двух Ш-образных частей, на которые надеты две пары намагничивающих катушек с одинаковым числом витков, причём все четыре катушки включаются последовательно и создают поле, направление которого показано на рисунке. Средняя перемычка ярма имеет зазор, в котором помещена подвижная рамка, связанная через потенциометр  $\Pi$  с баллистическим гальванометром. Величина крайних зазоров может изменяться, позволяя проводить измерения на образцах различной длины. Принцип работы прибора аналогичен принципу работы электрического моста.

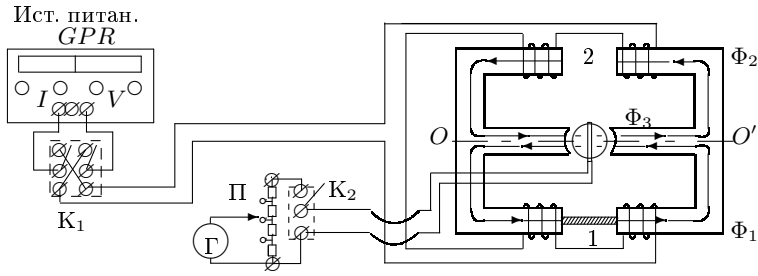


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Если части ярма, расположенные по обе стороны от плоскости  $OO'$ , совершенно одинаковы, то при включении тока в намагничивающие катушки магнитный поток в средней перемычке ярма отсутствует.

Если же в один из зазоров 1 или 2 вставить испытуемый образец, то баланс нарушается, и в перемычке создаётся магнитный поток, связанный простым соотношением с потоком в образце.

Выберем направления магнитных потоков так, как это показано на рис. 2. Тогда

$$\Phi_3 = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (5)$$

где  $\Phi_1$  — поток в зазоре 1,  $\Phi_2$  — поток в зазоре 2,  $\Phi_3$  — поток в перемычке. (Наличие потоков рассеяния приводит к тому, что потоки, проходящие через зазор 2 и через вторую половину ярма, оказываются не равными друг другу. Существенно, однако, что потоки рассеяния слабо зависят от внесения образца и поэтому всегда с хорошей точностью совпадают в зазорах 1 и 2. Формула (5) при этом выполняется очень точно.) Если образец помещается в зазор 1, то

$$\Phi_1 = H_1(S_0 - \sigma) + B_1\sigma, \quad \Phi_2 = H_2S_0, \quad (6)$$

где  $B_1$  — индукция в образце. Из (5) и (6) следует

$$\Phi_3 = (B_1 - H_1)\sigma + (H_1 - H_2)S_0. \quad (7)$$

В области, далёкой от насыщения, для ферромагнетиков справедливо неравенство  $B_1 \gg H_1$ , поэтому членом  $H_1\sigma$  можно пренебречь по сравнению с  $B_1\sigma$ .

Заметим, кроме того, что напряжённости поля в зазорах 1 и 2 с большой точностью равны друг другу. В этом можно убедиться, рассматривая циркуляции вектора  $H$  по контурам  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Составляющие циркуляции  $H$ , взятые по пути, проходящему по ярму, пренебрежимо малы. Токи в катушках и число витков в них для обоих путей интегрирования одинаковы. Одинаковы, следовательно, и напряжённости поля в обоих зазорах, поэтому

$$\Phi_3 \cong B_1\sigma. \quad (8)$$

Поток, проходящий через перемычку, равен, таким образом, потоку, пронизывающему образец; поток, проходящий через рамку, пропорционален поэтому искомому потоку. При повороте рамки на  $90^\circ$  через присоединённый к ней гальванометр проходит ток. Отброс стрелки баллистического гальванометра  $\alpha$  пропорционален изменению магнитного потока в рамке и, следовательно, искомому потоку, проходящему через образец

$$B_1\sigma = A\alpha. \quad (9)$$

Коэффициент пропорциональности  $A$  характеризует чувствительность прибора и подлежит определению. Формула (9) позволяет, таким образом, находить индукцию образца по отбросу стрелки гальванометра. Напряжённость магнитного поля в образце определяется по величине намагничивающего тока.

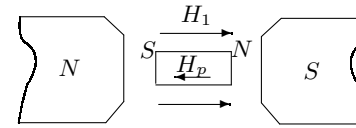


Рис. 3

Величина индукции ферромагнитного тела, помещённого во внешнее магнитное поле, зависит не только от материала образца, но и от формы. Образец, помещённый во внешнее магнитное поле, намагничивается. На его поверхностях образуются магнитные полюсы, расположенные таким образом, что создаваемое ими поле  $H_p$  направлено навстречу полю  $H_1$  (рис. 3). Эффективное поле  $H_i$ , действующее внутри образца, будет

$$H_i = H_1 - H_p. \quad (10)$$

Магнитная индукция ферромагнетика

$$B = H_i + 4\pi J. \quad (11)$$

Размагничивающее поле  $H_p$  пропорционально намагниченности вещества

$$H_p = N_p J. \quad (12)$$

Таким образом, для достижения величины магнитной индукции, равной  $B$ , в теле, характеризующимся размагничивающим фактором  $N_p$ , необходимо приложить внешнее поле

$$H_1 = H_i + H_p = H_i + N_p J = H_i + \frac{N_p}{4\pi}(B - H_i). \quad (13)$$

Теоретический расчёт коэффициента размагничивания  $N_p$  очень сложен и может быть выполнен только для эллипсоида вращения. Например, для шара  $N_p/4\pi = 1/3$ , для тонкого диска, когда  $H$  перпендикулярно плоскости

диска  $N_p/4\pi = 1$ , для бесконечно длинного цилиндра, когда  $H$  перпендикулярно оси цилиндра  $N_p/4\pi = 1/2$ , а когда  $H$  параллельно оси цилиндра  $N_p/4\pi = 0$ . В остальных случаях, коэффициент размагничивания определяется экспериментально.

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается: прокалибровать отклонения гальванометра в единицах магнитной индукции  $B$ ; снять начальную кривую намагничивания и предельную петлю гистерезиса для образца из углеродистой стали, чтобы определить индукцию насыщения, коэрцитивную силу и максимальную магнитную проницаемость материала; определить размагничивающий фактор образца.

### I. Подготовка приборов к работе

**Не включайте приборы в сеть без предварительной настройки.**

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой, изображённой на рис. 2.
2. Ознакомьтесь с назначением и расположением ручек управления источника питания GPR.

Подключите установку к сети.

Разомкните ключи  $K_1$  и  $K_2$ , установите все четыре ручки регулировки источника питания в нулевое положение и включите прибор в сеть.

3. Отрегулируйте источник питания для калибровки гальванометра:
  - а) замкните ключ  $K_1$ , установите обе ручки регулировки тока на максимум; ручку плавной/FINE регулировки напряжения — на максимум, грубой/COARSE — на 5,5–5,7 В; при этом прибор показывает ток, текущий через катушки  $I = 0,4$  А;
  - б) поставьте ручку грубой регулировки тока на 0, ручкой плавной регулировки тока установите предельный ток для этого упражнения — 0,35 А; установите обе ручки регулировки  $V$  на 0 и в дальнейшем плавно увеличивайте ток, используя ТОЛЬКО регуляторы напряжения (при неизменном положении регуляторов тока);
  - в) проследите, как увеличивается ток при работе с регуляторами  $V$ : сначала ручкой  $V$ /ПЛАВНО увеличивайте ток шагами 0,02–0,03 А в диапазоне от 0 до 0,2 А, затем ручкой  $V$ /ГРУБО в диапазоне от 0,2 до 0,35 А шагами по 0,05 А;
  - г) сначала ручкой  $V$ /ГРУБО, затем  $V$ /ПЛАВНО уменьшите ток до нуля.

### II. Калибровка гальванометра

1. Для калибровки гальванометра – определения константы  $A$  в формуле (9) – необходимо снять кривую начального намагничивания железного образца,

имеющего форму тонкостенного цилиндра площадью сечения  $\sigma = 0,58$  см<sup>2</sup>. Для удобства измерений железный образец надет на дюралевый цилиндр той же длины. Перед началом измерений образец необходимо размагнитить.

Установка для размагничивания размещена на отдельном столе (у окна). Поместите образец в соленоид и включите в сеть источник переменного тока (вариак). Амплитуду тока сначала следует увеличить до максимума, а затем медленно (за 5–10 с) уменьшить до нуля. Закончив, отключите вариак от сети.

2. Отключите катушки от источника питания (разомкните ключ  $K_1$ ). Вставьте в один зазор ярма короткий дюралевый стержень, в другой — размагниченный исследуемый образец (образец должен быть в контакте с полюсами ярма) и замкните ключ  $K_1$ .
3. Подключите измерительную рамку к гальванометру ключом  $K_2$  (штырь потенциометра в среднем положении). Установите минимальный ток в намагничивающих катушках ( $\approx 0,02$ – $0,03$  А) и снимите отброс гальванометра  $\Delta x$  мм ( $\sim \alpha$ ), возникающий при повороте измерительной рамки на 90°.

Плавно увеличивая ток до максимума в режиме, выбранном при настройке прибора ( $\approx 0,35$  А), определите для каждого тока отброс гальванометра  $\Delta x$ .

Если изменение тока  $\Delta I$  окажется больше намеченного, нельзя уменьшать  $\Delta I$ , т.к. это исказит ход кривой намагничивания; следует размагнитить образец и начать измерения заново с нулевого тока.

Закончив измерения, сначала ручкой  $V$ /ГРУБО, затем  $V$ /ПЛАВНО уменьшите ток до нуля; разомкните ключ  $K_1$  и уберите цилиндры из зазоров.

### III. Начальная кривая и петля гистерезиса для образца из углеродистой стали

1. Подготовьте источник питания в соответствии с п I.3а задания, установив  $V = 13$  В,  $I_{\max} = 0,9$  А.  
Поставьте ручку грубой регулировки тока на 0, ручкой плавной регулировки тока установите предельный ток для этого упражнения — 0,75 А.  
Установите обе ручки регулировки  $V$  на 0 и подберите режим (шаг) плавного увеличения тока от 0 до 0,75 А (используя регуляторы  $V$ ).
2. Вместо образца из железа вставьте в зазор ярма размагниченный образец из углеродистой стали с таким же (0,58 см<sup>2</sup>) сечением. Стальной образец, имеющий форму цилиндра, расположен в центре цилиндра из дюрала.
3. Монотонно увеличивая ток от 0 до  $I_{\max} = 0,75$  А (в выбранном режиме), снимите начальную кривую намагничивания стали [ $\Delta x = f(I)$ ] и переходите к предельной петле гистерезиса.

Для этого, дойдя до максимального тока, начинайте уменьшать ток в обратном порядке: сначала ручкой  $V$ /ГРУБО до 0,2 А, затем — ручкой  $V$ /ПЛАВНО до нуля.

При нулевом токе измените направление тока переключением двойного ключа и проведите измерения от 0 до  $-I_{\max}$  и, наконец, от  $-I_{\max}$  до  $I_{\max}$  с переключением направления тока в нуле (замкнутая петля).

В случае нарушения плавного приращения тока при снятии начальной кривой следует размагнитить образец и начать измерения сначала, а при снятии петли достаточно начать измерения с максимального тока. Нельзя, вернувшись на один шаг, повторить измерения.

#### IV. Определение размагничивающего фактора

Влияние коэффициента размагничивания можно наблюдать при намагничивании образца, помещённого в зазор ярма, размер которого больше длины образца.

1. Подготовьте источник питания в соответствии с п. I.3 задания, установив  $V = 25$  В,  $I_{\max} = 1,8$  А.

Поставьте ручку плавной регулировки тока на 0, ручкой  $I$ /ГРУБО установите предельный ток для этого упражнения — 1,5 А (горит  $CC$ ).

Установите обе ручки регулировки  $V$  на 0 и выберите режим работы (шаг 0,02–0,03 А в диапазоне от нуля до 0,2 А и шаг 0,1 А в диапазоне от 0,2 до 1,5 А).

2. Размагнитьте железный образец, надетый на более длинный дюралевый стержень (симметрично относительно концов стержня). При разомкнутом ключе вставьте образец в один зазор ярма, а в другой — дюралевый стержень такой же длины.

Снимите начальную кривую намагничивания, изменяя рабочий ток шагом 0,1 сначала ручкой  $V$ /ПЛАВНО от нуля до 0,2 А, затем ручкой  $V$ /ГРУБО от 0,2 до 1,5 А.

3. Можно с помощью милливексметра оценить коэффициенты пересчёта  $H = f(I)$  и  $B = f(\Delta x)$ , если при токе  $I = 1,5$  А измерить поле в зазоре.

#### V. Обработка результатов

1. Постройте на графике кривую начального намагничивания в координатах  $\Delta x, H$ ). Для данного зазора ярма напряжённость поля в зазоре  $H$  (в эрстедах) связана с силой тока  $I$  (в амперах) соотношением  $H = 530I$ .

Затем на тот же график нанесите кривую намагничивания железа в координатах  $(B, H)$ , пользуясь данными таблицы 1.

Т а б л и ц а 1

Кривая намагничивания железа

$H$ (Э)	2	4	6	8	10	15	25	35	50	75	100	125	150	200
$B$ (кГс)	1	2,0	2,95	3,7	4,4	6,85	10	12,1	14,2	16	17,2	18	18,8	19,5

Изменяя относительный масштаб  $B$  и  $\Delta x$ , добейтесь наилучшего совпадения обеих кривых. Таким образом, величина отклонения гальванометра будет проградуирована величиной индукции  $B$ .

2. Для образца из углеродистой стали постройте начальную кривую и петлю гистерезиса в координатах  $(B, H)$ . В нескольких точках начальной кривой определите дифференциальную магнитную проницаемость ( $\mu_{\text{диф}} = dB/dH$ ) и постройте график в координатах  $(\mu_{\text{диф}}, H)$ .

Определите по графикам индукцию насыщения, коэрцитивную силу и максимальную магнитную проницаемость стали. Оцените погрешности и сравните результат с табличным.

3. Используя калибровку гальванометра  $B = f(\Delta x)$ , постройте на одном графике кривые начального намагничивания  $B = f(H)$  для двух образцов из железа. Для большего зазора ярма напряжённость поля  $H$  (в эрстедах) связана с силой тока  $I$  (в амперах) соотношением  $H = 435I$ .

Проведите на графике горизонтальную прямую вблизи индукции насыщения и определите соответствующие значения  $H_1$  и  $H_2$ .

Пусть  $H_1$  — значение внешнего поля для случая, когда зазор ярма равен длине образца. В этом случае влиянием размагничивающего фактора можно пренебречь. Тогда внешнее поле  $H_1$  равно внутреннему полю в образце и, следовательно, равно внутреннему полю в образце для второго случая, т.к. индукции в образцах равны. По формуле (13) можно записать

$$H_2 = H_1 + \frac{N_p}{4\pi}(B - H_1) \approx H_1 + \frac{N_p}{4\pi}B.$$

Тогда коэффициент размагничивания будет равен

$$\frac{N_p}{4\pi} \approx \frac{H_2 - H_1}{B}.$$

Рассчитайте размагничивающий фактор для нескольких значений  $B$  (нескольких горизонталей) и оцените среднее значение размагничивающего фактора.

#### Контрольные вопросы

1. Как определяются напряжённость и индукция магнитного поля? В каких единицах измеряются эти величины в системах СИ и СГС?
2. Сформулируйте (и докажете) граничные условия для напряжённости и индукции магнитного поля.
3. Почему при  $\mu \gg 1$  рассеяние магнитного потока будет мало?
4. Какие материалы называются магнитомягкими?
5. Чем пренебрегается в изложенной теории? Запишите условия, при выполнении которых сделанные приближения работают хорошо.

6. Каким условиям должны удовлетворять размеры ярма, зазора и образца, чтобы краевыми эффектами можно было пренебречь?
7. Что такое размагничивающий фактор?

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. III. Электричество. — М.: Наука, 1983. Гл. II, §§ 46, 47.
2. *Фейнман, Лейтон, Сэндс* Фейнмановские лекции по физике. Ч. 5. Электричество и магнетизм. — М.: Мир, 1967. Гл. 7.

Исправлено 2-ХП-2012Г.