

**Министерство образования Российской Федерации  
УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ  
И ЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ЖЕЛЕЗА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к лабораторной работе № 52  
по курсу общей физики**

**Уфа 2004**

Министерство образования Российской Федерации  
УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра общей физики

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ  
И ЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ЖЕЛЕЗА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе № 52  
по курсу общей физики

Уфа 2004

Составители: С. А. Шатохин, В. Р. Строкина

УДК 537.622.4 (07)

ББК 22.334 (Я7)

Изучение свойств ферромагнетиков и явления магнитного гистерезиса для железа: Методические указания к лабораторной работе № 52 по курсу общей физики/ Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. С.А. Шатохин, В.Р. Строкина. – Уфа, 2004. – 17 с.

Приведена классификация магнетиков и изложен механизм возникновения намагниченности различных веществ. Особое внимание уделено свойствам и характеристикам ферромагнетиков. Описаны принципиальная схема лабораторной установки и методика проведения измерений.

Предназначены для студентов технических вузов, изучающих курс общей физики.

Табл. 1. Ил. 8 . Библиогр.: 3 назв.

Рецензенты: Е. В. Трофимова,  
М. П. Иванов

©Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2004

Составители: ШАТОХИН Сергей Алексеевич  
СТРОКИНА Венера Рамазановна

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ  
И ЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ЖЕЛЕЗА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе № 52  
по курсу общей физики

Подписано в печать 07.04.2004. Формат 60x80 1/16  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr  
Усл. печт. л. 1,0. Усл. кр.- отт. 1,0. Уч. –изд.л. 0,9.  
Тираж 300 экз. Заказ №  
Уфимский государственный авиационный технический университет  
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

## Содержание

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
2.1. Намагниченность. Магнитное поле в веществе.....	4
2.2. Диа – и парамагнетики.....	5
2.3. Ферромагнетики.....	7
3. Экспериментальная часть.....	12
3.1. Описание установки и метода измерений.....	12
4. Требования по технике безопасности.....	15
5. Порядок выполнения работы.....	16
6. Контрольные вопросы.....	17
Список литературы.....	17

## Лабораторная работа № 52

### Изучение свойств ферромагнетиков и явления магнитного гистерезиса для железа

#### 1. Цель работы

Изучение магнитных свойств вещества. Расчет и построение кривой намагничивания, снятие петли гистерезиса и определение тепловых потерь на перемагничивание ферромагнетиков. Вычисление коэрцитивной силы и остаточной намагниченности изучаемого образца железа.

#### 2. Теоретическая часть

##### 2.1. Намагниченность. Магнитное поле в веществе

Все вещества в магнитном поле способны намагничиваться, т. е. создавать собственное магнитное поле. Такие вещества называются магнетиками. Магнитное поле магнетиков характеризуется *вектором намагниченности*  $\vec{J}$ , который равен магнитному моменту единицы объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_{m \text{ ат}}}{\Delta V}, \quad (2.1)$$

где  $\vec{P}_{m \text{ ат}}$  – магнитные моменты атомов или молекул, находящихся в пределах малого объема  $\Delta V$ . Величина  $\vec{P}_{m \text{ ат}}$  представляет в свою очередь векторную сумму орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов, а также магнитных моментов ядер, входящих в состав атомов.

Магнитное поле в магнетике складывается из двух полей: внешнего  $\vec{B}_0$  и внутреннего  $\vec{B}_{\text{вн}}$ , создаваемого намагниченным веществом:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{вн}} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}, \quad (2.2)$$

где  $\vec{H}$  – напряженность внешнего магнитного поля;  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Намагниченность  $\vec{J}$  связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$\vec{J} = \varkappa \vec{H}, \quad (2.3)$$

где  $\varkappa$  – безразмерная величина, называемая магнитной восприимчивостью вещества. Учитывая (2.2), индукцию магнитного поля в магнетике можно представить

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \varkappa) \vec{H} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (2.4)$$

или

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0 \quad (2.5)$$

Величина  $\mu$ , равная

$$\mu = 1 + \varkappa \quad (2.6)$$

называется *магнитной проницаемостью*, она показывает во сколько раз индукция магнитного поля в магнетике отличается от внешнего поля.

По значению магнитной проницаемости  $\mu$  все вещества делятся на три группы: диамагнетики ( $\mu < 1$ ), парамагнетики ( $\mu > 1$ ) и ферромагнетики ( $\mu \gg 1$ ). Особенностью ферромагнетиков является то, что  $\mu$  не является константой, а зависит от напряженности внешнего поля, т.е.  $\mu = \mu(H)$ .

## 2.2. Диа – и парамагнетики

Диамагнетиками являются вещества, атомы которых, находясь вне магнитного поля, имеют полный магнитный момент  $\vec{P}_{m\text{ат}}$  равный нулю. Только внешнее магнитное поле индуцирует магнитный момент атомов диамагнетика. В результате в нем возникает собственное поле

$$\vec{B}_{\text{вн}} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.7)$$

направленное, согласно правилу Ленца, *против* порождающего его внешнего поля (рис. 2.1). Все вещества в целом приобретают магнитный момент, направленный противоположно  $\vec{H}$ , поэтому диамагнетик выталкивается из магнитного поля.

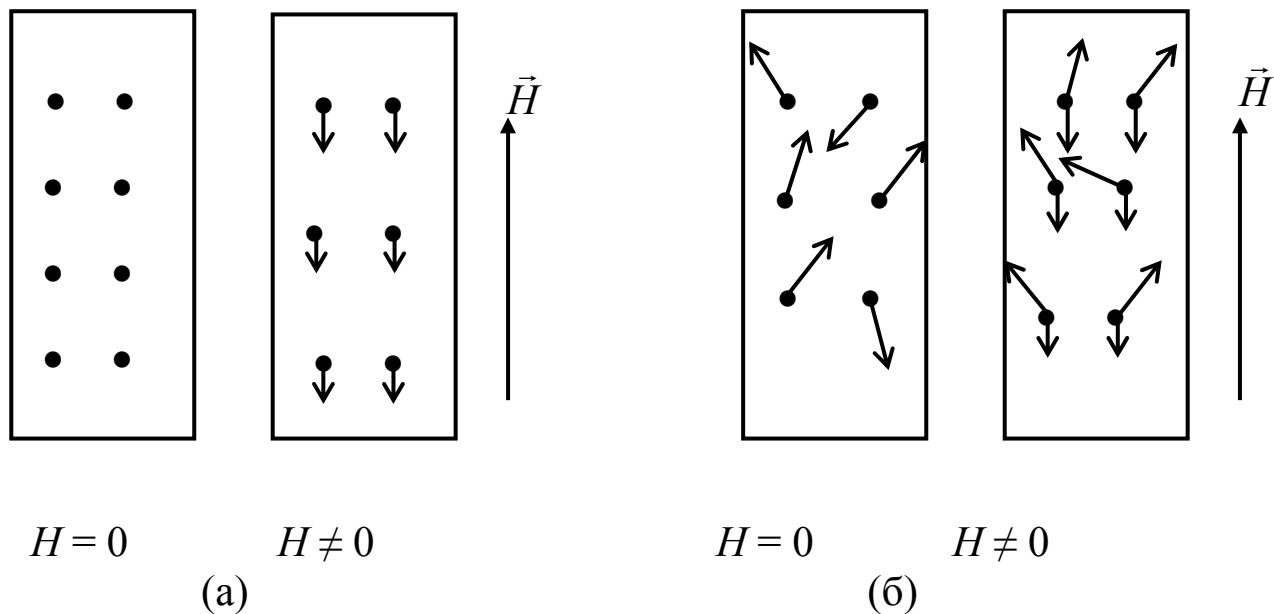


Рис. 2.1. Возникновение собственного магнитного поля в диамагнетиках (а) и парамагнетиках (б)

Атомы парамагнетиков обладают магнитным моментом даже в отсутствии внешнего магнитного поля (орбитальные и спиновые магнитные моменты электронов не скомпенсированы). Однако, в следствии хаотического расположения атомов, вещество в целом не обладает магнитным моментом. В этом случае внешнее магнитное поле не только порождает индукционный момент, но и ориентирует магнитные моменты атомов, устанавливая их преимущественно по направлению поля (рис. 2.1). Возникающий при этом положительный (т.е. направленный вдоль поля  $\vec{H}$ ) магнитный момент значительно больше, чем отрицательный индукционный. В итоге собственное магнитное поле  $\vec{B}_{\text{вн}}$  совпадает по направлению с внешним, и следовательно, парамагнетик втягивается в магнитное поле. Следует отметить, что тепловое хаотическое движение атомов и молекул препятствует строгой ориентации магнитных моментов вдоль поля, поэтому намагниченность парамагнетиков зависит от температуры:

$$\chi = \frac{C}{T}. \quad (2.8)$$

Приведенное соотношение (2.8) носит название закона Кюри (открыт П. Кюри в 1896 г.). Коэффициент пропорциональности  $C$  зависит от рода вещества и находится в пределах  $10^{-5} - 10^{-6}$  К.

Все диа- и парамагнетики являются слабо намагничивающимися веществами. Так для диамагнетиков величина



магнитной восприимчивости  $\chi \sim 10^{-6}$ , а для парамагнетиков –  $\chi \sim 10^{-4}$ . К диамагнетикам относятся многие металлы (Bi, Ag, Au, Cu), парамагнетиками являются редкоземельные элементы (Pt, Al и т.д.)

### 2.3. Ферромагнетики

Свойства ферромагнитных веществ существенно отличаются от рассмотренных выше свойств диа – и парамагнетиков:

1) магнитная проницаемость  $\mu$  достигает больших значений порядка  $10^2 - 10^6$ ;

2) намагниченность ферромагнетиков  $J$  имеет нелинейную зависимость от  $H$ ;

3) наличие магнитного гистерезиса – явления запаздывания изменения  $B$  в ферромагнетике по отношению к изменению  $H$ ;

4) способность сохранять намагниченность даже в отсутствии внешнего магнитного поля.

К ферромагнетикам принадлежат железо (наиболее распространенный представитель – отсюда и общее название), никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными материалами (MnAlCu, CrFe и др.)

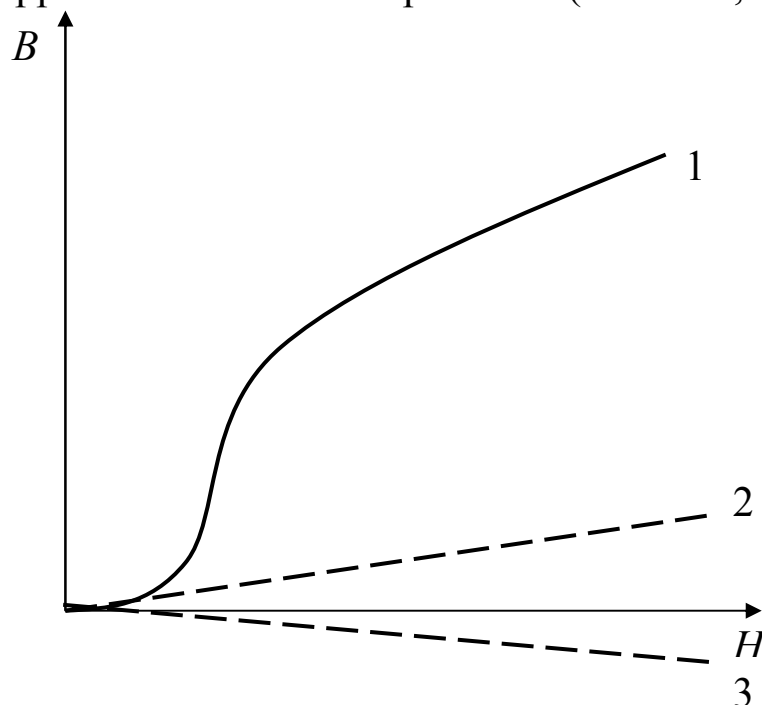


Рис. 2.2. Зависимость индукции магнитного поля от напряженности для различных магнетиков.  
1 – ферромагнетики; 2 – парамагнетики; 3 – диамагнетики

Свойства ферромагнетиков заключаются в особенностях их кристаллической структуры. Ферромагнетик обладает отдельными микроскопическими (линейные размеры  $\sim 10^{-6} \div 10^{-4}$  м) областями (доменами), которые намагничены до насыщения даже в отсутствии внешнего поля. Однако магнитные моменты всех этих доменов ориентированы хаотически, поэтому суммарный магнитный момент макроскопического объема равен нулю.

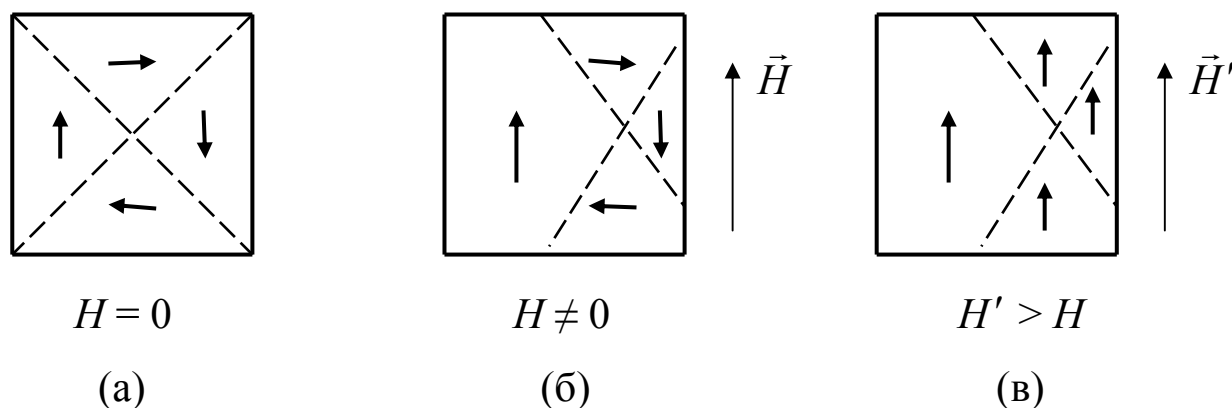


Рис. 2.3. Изменение доменной структуры ферромагнетика при намагничивании:  
 а – внешнее поле отсутствует; б – процесс смещения;  
 в – процесс вращения магнитных моментов

При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле ориентируются магнитные моменты не отдельных атомов (как в случае парамагнетиков), а целых областей – доменов. Процесс намагничивания делится на три стадии. В начальный момент происходит смещение границ доменов (рис. 2.3), при этом увеличиваются размеры тех из них, магнитные моменты которых совпадают с направлением внешнего поля. Если на этой стадии внешнее поле выключить, то ферромагнетик вернется в исходное состояние. Таким образом процесс намагничивания на первой стадии является обратимым.

Процесс смещения границы доменов продолжается по мере увеличения внешнего магнитного поля. Наступает вторая стадия намагничивания. Особенностью этой стадии является необратимость намагничивания, т.е. размеры доменов не возвращаются в исходное состояние, даже при выключении внешнего поля.

Третья стадия наступает при больших значениях напряженности внешнего поля. В этом случае осуществляется процесс вращения магнитных моментов доменов вдоль вектора  $H$ . Завершением этой стадии является насыщение намагниченности, которая наступает при одинаковой ориентации магнитных моментов всех без исключения доменов.

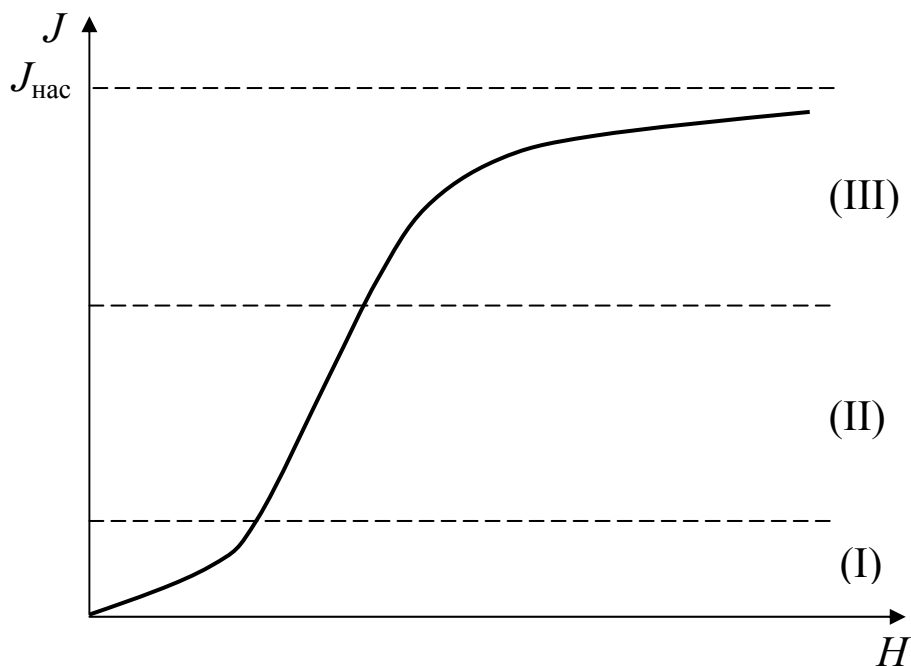


Рис. 2.4. Основная кривая намагничивания ферромагнетика.  
 I – процессы обратимого смещения границ; II – процессы необратимого смещения границ; III – процессы вращения

Магнитная проницаемость  $\mu$  так же является нелинейной функцией от  $H$ , что является следствием зависимости  $J(H)$ . Действительно из выражения (2.2) следует:

$$\mu = \frac{B}{B_0} = 1 + \frac{J}{H}. \quad (2.9)$$

Когда намагниченность достигает насыщения  $J_{\text{нас}}$ , а напряженность растет, значение  $\mu$  стремится к единице. График зависимости  $\mu(H)$  показан на рис. 2.5.

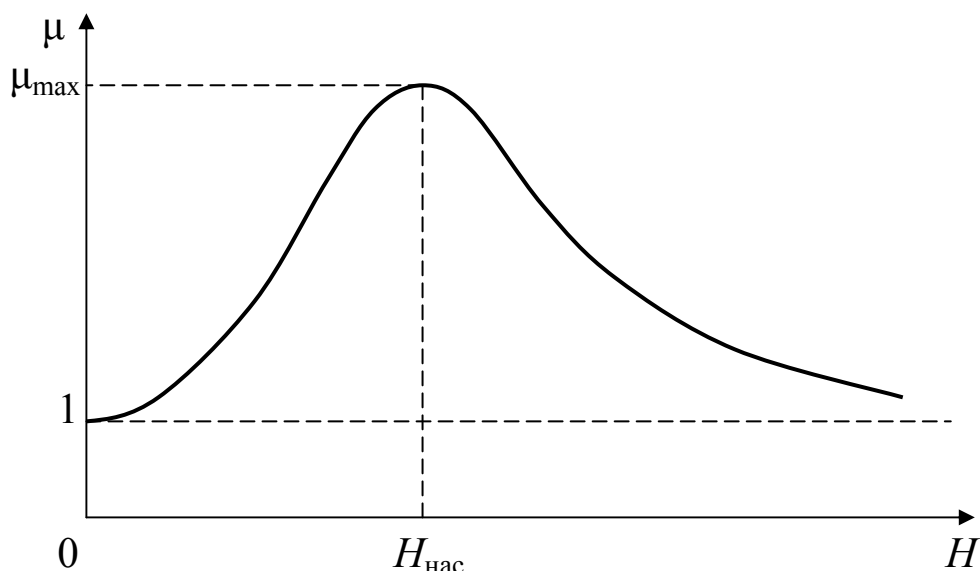


Рис. 2.5. Кривая зависимости магнитной проницаемости от напряженности внешнего поля

Магнитным *гистерезисом* называется явление запаздывания изменения магнитной индукции  $B$  в ферромагнетике по отношению к изменению напряженности  $H$  внешнего поля. В этом запаздывании проявляется зависимость намагниченности от предшествующего его состояния. *Петлей гистерезиса* (рис. 2.6) называется кривая изменения магнитной индукции ферромагнетика, помещенного во внешнее магнитное поле, изменяющееся от  $+H$  до  $-H$  и обратно.

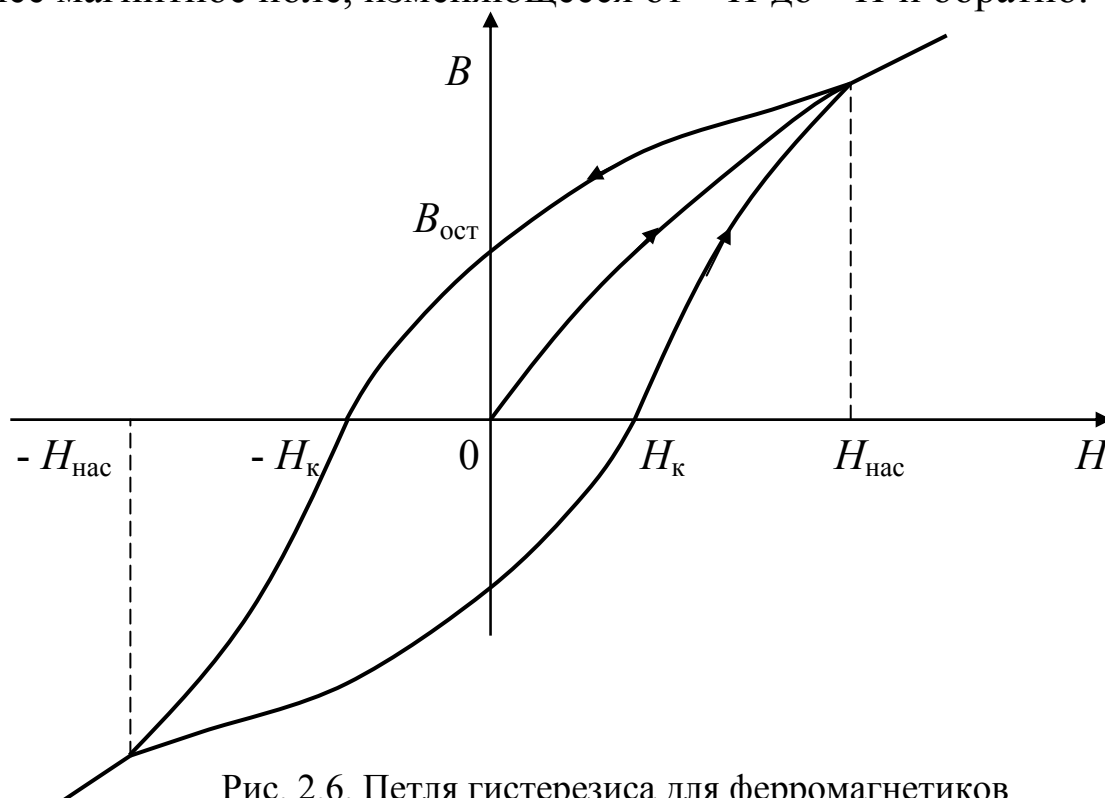


Рис. 2.6. Петля гистерезиса для ферромагнетиков

При изменении  $H$  от нуля в сторону положительных значений индукция  $B$  возрастает, причем кривая сменяется прямолинейным участком после достижения насыщения (см. рис. 2.2). При уменьшении  $H$  до 0 магнитная индукция запаздывает в уменьшении и при  $H = 0$  оказывается равной  $B_{\text{ост}}$  (остаточное намагничивание). Для полного размагничивания образца нужно приложить магнитное поле противоположного направления  $H_k$ , называемое *коэрцитивной силой* (задерживающей напряженностью).

Перемагничивание образца сопровождается потерями энергии магнитного поля, которая затрачивается на переориентировку доменов. Объемная плотность энергии магнитного поля определяется соотношением

$$w = \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}. \quad (2.10)$$

Изменение энергии при небольшом намагничивании будет:

$$dw = \mu \mu_0 H dH = H (\mu \mu_0 dH) = H dB. \quad (2.11)$$

Таким образом работа магнитного поля за цикл перемагничивания *единицы объема* ферромагнетика будет равна:

$$q = \oint dw = \oint H dB, \quad (2.12)$$

т.е. пропорциональна площади петли гистерезиса. Ясно, что потери внешнего магнитного поля переходят во внутреннюю энергию образца и, в конечном счете, приводят к его нагреванию.

По величинам  $H_k$  и  $q$  ферромагнетики подразделяются на *мягкие* ( $H_k < 100$  А/м, малая площадь  $q$ ) и *жесткие* ( $H_k > 100$  А/м, площадь  $q$  большая). Магнитожесткие материалы используются для создания постоянных магнитов, а магнитомягкие применяются при изготовлении сердечников трансформаторов.

Поскольку разница в энергиях между намагниченным и ненамагниченным состояниями составляет лишь несколько десятых электронвольт, то повышение температуры образца (энергия теплового движения  $\sim kT$ ) может уничтожить намагничивание доменов. При температуре, называемой *точкой Кюри*, намагниченность доменов действительно исчезает и ферромагнетик превращается в парамагнетик. Температура Кюри для различных веществ имеет строго определенные значения. Например для железа  $770^\circ\text{C}$ , кобальта  $1127^\circ\text{C}$ , никеля  $358^\circ\text{C}$ , гадолиния  $16^\circ\text{C}$ .

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Описание установки и метода измерений

Петлю гистерезиса можно получить на экране осциллографа, если: а) ферромагнитный образец поместить в переменное магнитное поле; б) на горизонтально отклоняющие пластины подать напряжение  $U_x$ , пропорциональное  $H$ ; в) на вертикально отклоняющие –  $U_y$ , пропорциональное  $B$ .

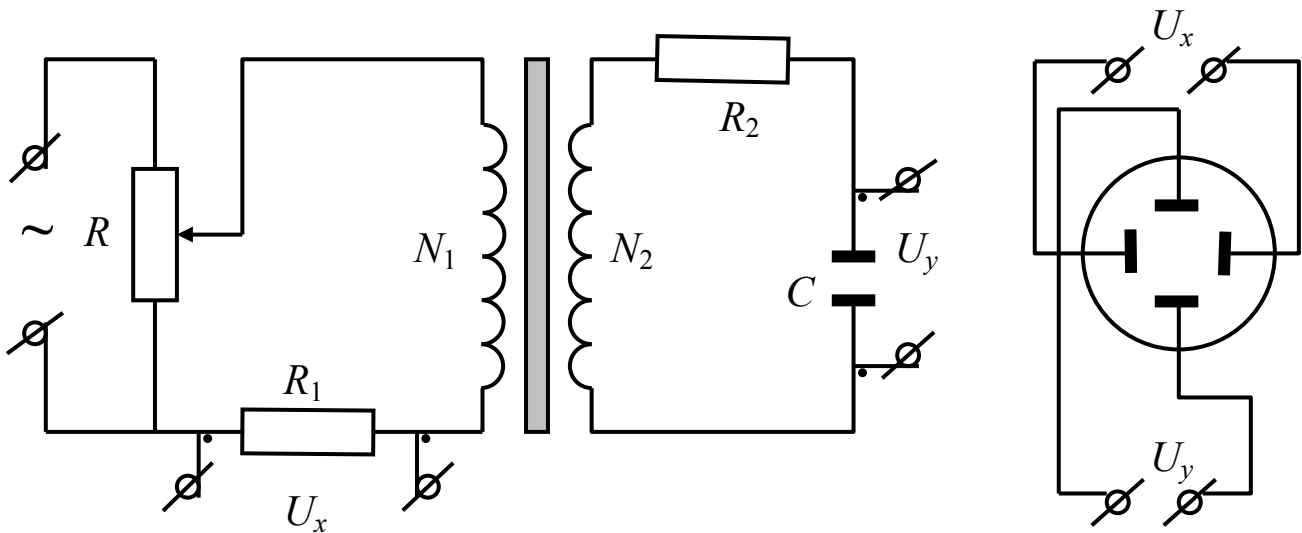


Рис. 3.1. Схема установки для получения петли гистерезиса на экране осциллографа

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.1. Исследуемым веществом является железо, имеющее форму цилиндрического стержня, на который намотаны две обмотки. Первичная обмотка питается через сопротивление  $R_1$  переменным током. Напряженность магнитного поля внутри полого соленоида, образованного первичной обмоткой, равна

$$H = \frac{N_1}{l} I_1, \quad (3.1)$$

где  $I_1$  и  $N_1$  – сила тока и число витков в первичной обмотке;  $l$  – длина соленоида и стержня внутри него.

Поскольку напряжение на сопротивлении  $R_1$  равно  $U_x = I_1 R_1$ , то с учетом (3.1)

$$U_x = \frac{l R_1}{N_1} H, \quad (3.2)$$

т.е. пропорционально  $H$ .

Во вторичной обмотке источником тока является ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.3)$$

где  $\Phi$  – поток вектора магнитной индукции через вторичную обмотку;  $N_2$  – число витков на ней. Если площадь стержня равна  $S$ , то принимая во внимание, что  $\Phi = B \cdot S$

$$\mathcal{E} = -N_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (3.4)$$

По закону Кирхгофа для замкнутой цепи вторичной обмотки (такая схема называется интегрирующей  $R - C$  цепочкой) можно записать

$$\mathcal{E} = U_c + I_2 R_2, \quad (3.5)$$

где  $U_c$  – напряжение на конденсаторе;  $I_2$  – ток во вторичной обмотке. Значение сопротивления  $R_2$  выбирается достаточно большим ( $\sim 10$  кОм), поэтому первым слагаемым в (3.5) можно пренебречь. Таким образом, учитывая (3.4)

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (3.6)$$

Напряжение, снимаемое с конденсатора  $U_y$  и равное ему  $U_c$  будет пропорционально  $B$ . Действительно

$$U_y = U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt, \quad (3.7)$$

где  $q$  – заряд,  $C$  – емкость конденсатора.

Подставляя  $I_2$  из (3.6) получим

$$U_y = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \cdot B. \quad (3.8)$$

В результате на одни пластины осциллографа подается напряжение пропорциональное  $H$ , а на другие – пропорциональные  $B$ .

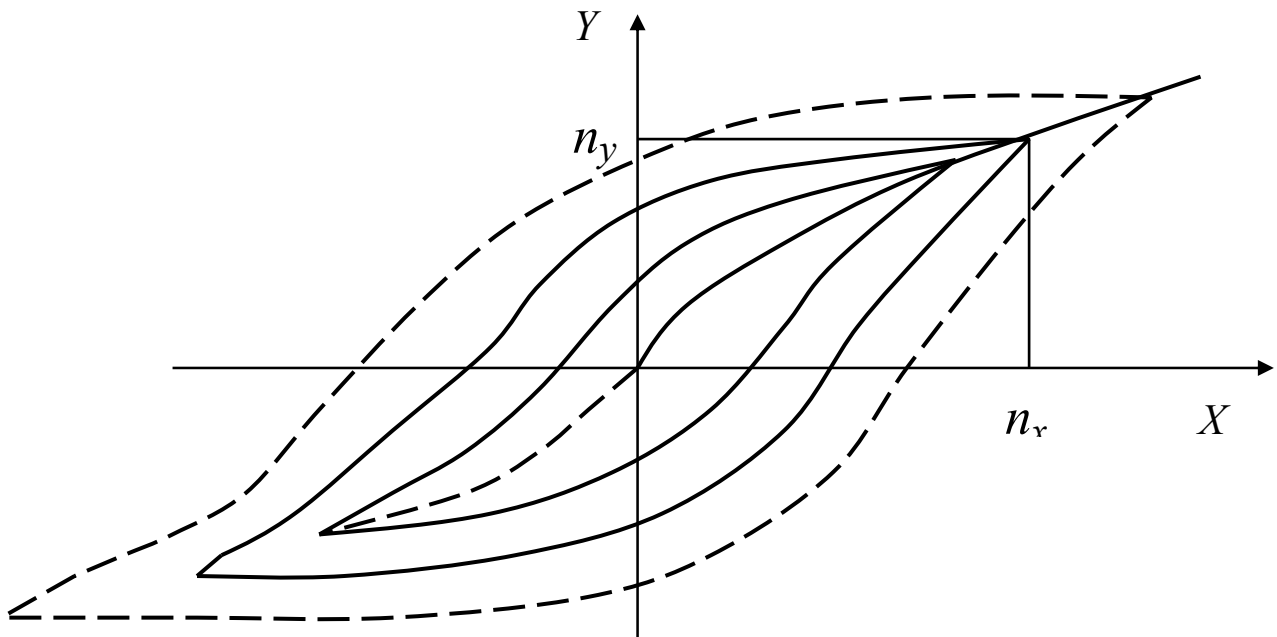


Рис. 3.2

При увеличении напряжения  $U_x$  потенциометром  $R$  (см. рис. 3.1), будет увеличиваться амплитуда колебаний  $H$ , при этом на экране будет получаться последовательный ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка петли гистерезиса находится на кривой намагничивания. Следовательно, для построения кривой  $B = B(H)$  необходимо снять с осциллографа координаты  $n_x$  и  $n_y$  вершины петель гистерезиса, которые определяются в делениях шкалы экрана осциллографа (рис. 3.2).

Величины  $B$  и  $H$  можно вычислить из соотношений (3.2) и (3.8), переписанных в виде:

$$H = \frac{N_1}{l R_1} \cdot U_x; \quad B = \frac{R_2 C}{N_2 S} \cdot U_y. \quad (3.9)$$

Зная координаты  $n_x$  и  $n_y$  можно определить  $U_x$  и  $U_y$ :

$$U_x = u_x \cdot n_x; \quad U_y = u_y \cdot n_y, \quad (3.10)$$

где  $u_x$  и  $u_y$  – напряжения вызывающие отклонение электронного луча на одно деление в направлении осей  $X$  и  $Y$  соответственно. Эти величины задаются ручками «чувствительность» на панели осциллографа и имеют размерность  $V/\text{дел}$  или  $mV/\text{дел}$ . Таким образом окончательные выражения для вычисления  $B$  и  $H$  принимают вид:

$$H = \frac{N_1 u_x}{l R_1} \cdot n_x = h_x \cdot n_x; \quad (3.11)$$



$$B = \frac{R_2 C u_y}{N_2 S} \cdot n_y = b_y \cdot n_y, \quad (3.12)$$

где

$$h_x = \frac{N_1 u_x}{l R_1} \quad \text{и} \quad b_y = \frac{R_2 C u_y}{N_2 S} \quad (3.13)$$

– масштабные коэффициенты, равные напряженности и индукции магнитного поля в пределах одного деления шкалы экрана осциллографа.

Потери на перемагничивание ферромагнетика пропорциональны площади петли гистерезиса, которую можно вычислить следующим образом. Цена деления координатной сетки осциллографа, как это следует из (3.13), равна  $h_x$  (по оси  $X$ ) и  $b_y$  (по оси  $Y$ ). Тогда площадь одной клетки будет равна  $h_x \cdot b_y$ . Если петля содержит  $N$  клеток, то теплота  $q$  выделяемая единицей объема равна

$$q = N \cdot h_x \cdot b_y. \quad (3.14)$$

Таким образом количество тепла, которое выделяется за 1с в изучаемом образце ферромагнетика объемом  $V = S \cdot l$  можно найти по формуле

$$Q = q V \nu = (N h_x b_y) (S l) \nu, \quad (3.15)$$

где  $\nu$  – частота переменного тока (число циклов за 1с);  $S$  и  $l$  – площадь сечения и длина ферромагнитного стержня.

Параметры установки:  $R_1=3$  Ом,  $R_2=14$  кОм,  $N_1=3000$ ,  $N_2=5000$ ,  $S=12,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>,  $l=0,08$  м,  $C=20$  мкФ,  $\nu=50$  Гц.

#### 4. Требования по технике безопасности

4.1. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с заданием и оборудованием.

4.2. Проверьте заземление лабораторной установки и изоляцию токоведущих проводов. Немедленно сообщите преподавателю о замеченных неисправностях.

4.3. Не оставляйте без присмотра включенную лабораторную установку.

4.4. По окончании работы приведите свое рабочее место в порядок. Обесточьте приборы.

## 5. Порядок выполнения работы

5.1. Задание I. Определение кривой намагничивания.

1. Включить лабораторный стенд и приборы.

2. Установить луч в центре экрана осциллографа.

3. С помощью потенциометра  $R$  установить максимальную по площади петлю гистерезиса. (Рекомендуемые значения:  $u_x \sim 0,1$  В/дел – канал I;  $u_y \sim 10$  мВ/дел – канал II).

4. Уменьшить потенциометром  $R$  подаваемое напряжение до минимума и получить точку в центре экрана.

5. Плавно увеличивая напряжение с помощью потенциометра  $R$  получить на экране осциллографа семейство петель гистерезиса (не менее 10). Определить для каждой из них координаты вершины ( $n_x; n_y$ ) и записать их в табл.

6. По формулам (3.11) – (3.13) вычислить  $h_x$  и  $b_y$ ,  $B$  и  $H$ , а также

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} . \quad (5.1)$$

7. По полученным данным построить графики зависимостей  $B = B(H)$  и  $\mu = \mu(H)$ .

$n_x$	$n_y$	$H, (A/m)$	$B, (Тл)$	$\mu$

5.2. Задание 2. Определение тепловых потерь на перемагничивание ферромагнетика.

1. С помощью потенциометра  $R$  установить максимальную по площади петлю гистерезиса.

2. Скопировать эту петлю на миллиметровую бумагу и по клеткам подсчитать ее площадь.

3. По формуле (3.15) вычислить мощность тепловых потерь  $Q$ .

5.3. Задание 3. Определение  $n_{xк}$  коэрцитивной силы и  $n_{y ост}$  остаточной намагниченности ферромагнетика.

1. По максимальной петле гистерезиса найти координаты  $n_{xк}$  и  $n_{y ост}$  пересечения с осями  $X$  и  $Y$ .

2. По формулам (3.11) – (3.13) вычислить коэрцитивную силу  $H_c$  и остаточную намагниченность.

3. По полученным данным определить группу ферромагнетика (мягкий или жесткий).

## **6. Контрольные вопросы**

1. Какие физические величины характеризуют магнитное поле в веществе?

2. Какие существуют типы магнетиков и чем они отличаются?

3. Как протекает процесс намагничивания диа – и парамагнетиков?

4. Какова природа ферромагнетизма?

5. Как протекает процесс намагничивания ферромагнетика?

6. Каковы основные свойства ферромагнетиков?

7. Что такое магнитный гистерезис, каковы его характеристики?

8. Как определяются потери на перемагничивание ферромагнетиков?

9. Какие существуют типы ферромагнетиков, где они применяются?

10. В чем заключается принцип работы экспериментальной установки?

## **Список литературы**

1. *Калашиников С. Г.* Электричество. – М.: Наука, 1977, 207 с.

2. *Трофимова Т. И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 1998, 542 с.

3. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 2. – М.: Наука, 1998, 496 с.